

ARCHÄOLOGISCHE BERICHTE
AUS DEM YEMEN

BAND VI

GEORGE C.
VAILLANT

BOOK FUND

MUSEUM LIBRARY
UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA

ARCHÄOLOGISCHE BERICHTE AUS DEM YEMEN
BAND VI

DEUTSCHES ARCHÄOLOGISCHES INSTITUT ŞAN'Ā'

ARCHÄOLOGISCHE BERICHTE
AUS DEM YEMEN

BAND VI

1993



VERLAG PHILIPP VON ZABERN · MAINZ AM RHEIN

DEUTSCHES ARCHÄOLOGISCHES INSTITUT ŞAN'Ā'

ANTIKE TECHNOLOGIE – DIE SABÄISCHE WASSERWIRTSCHAFT VON MĀRIB

HERAUSGEGEBEN VON
JÜRGEN SCHMIDT

TEIL 2: BODENKUNDLICHE UNTERSUCHUNGEN IN DER OASE MĀRIB

VON
WINFRIED WAGNER

1993

VERLAG PHILIPP VON ZABERN · MAINZ AM RHEIN

XIV, 99 Seiten mit 41 Abbildungen, 10 Tafeln mit 25 Abbildungen

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Archäologische Berichte aus dem Yemen / Deutsches Archäologisches
Institut Şan'ā'. – Mainz am Rhein : von Zabern.

Erscheint unregelmäßig. – Aufnahme nach Bd. 4 (1987)

ISSN 0722-9844

Bd. 6. Antike Technologie.

Teil 2. Bodenkundliche Untersuchungen in der Oase Mārib. – 1993

Antike Technologie : die sabäische Wasserwirtschaft von Mārib /
Deutsches Archäologisches Institut Şan'ā'.

Hrsg. von Jürgen Schmidt. – Mainz am Rhein : von Zabern.

NE: Schmidt, Jürgen [Hrsg.]; Deutsches Archäologisches Institut (Berlin)/Abteilung (Şan'ā')

Teil 2. Bodenkundliche Untersuchungen in der Oase Mārib /
von Winfried Wagner. – 1993

(Archäologische Berichte aus dem Yemen ; Bd. 6)

ISBN 3-8053-1363-2

NE: Wagner, Winfried

UNIVERSITY
OF
PENNSYLVANIA
LIBRARIES

© 1993 by Philipp von Zabern, Mainz am Rhein

ISBN 3-8053-1363-2

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet, dieses Buch oder Teile daraus
auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Printed in Germany by Philipp von Zabern

Printed on fade resistant and archival quality paper (PH 7 neutral)

Inhaltsverzeichnis

VORBEMERKUNG	VII
VORWORT	IX
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN UND TAFELN	XI
GLOSSAR DER WICHTIGSTEN GEOLOGISCHEN UND GEOMORPHOLOGISCHEN AUSDRÜCKE	XIII
1. EINLEITUNG	1
1.1 Die Bedeutung Südarabiens in der Antike	1
1.2 Forschungsstand	2
1.3 Problemstellung	3
1.4 Naturräumliche Bedingungen Südarabiens	6
1.4.1 Geographische Position des Yemen	6
1.4.2 Geologie und Tektonik des südarabischen Raumes	7
1.4.2.1 Präkambrium	7
1.4.2.2 Paläozoikum	7
1.4.2.3 Mesozoikum	7
1.4.2.4 Tertiär	7
1.4.2.5 Quartär	9
1.4.2.6 Tektonik	10
1.4.3 Böden des Yemen	10
1.4.4 Klima in Südarabien	11
1.4.4.1 Aktuelles Klima	11
1.4.4.2 Paläoklima in äquatorialer Nähe	16
1.4.4.3 Tektonische Einflüsse auf das Klima	18
1.5 Einführung in das Untersuchungsgebiet um Mārib	18
1.5.1 Geographische Lage von Mārib	18
1.5.2 Geologie des Einzugsgebietes des Wādī Dana	18
1.5.3 Klima von Mārib	21
1.5.3.1 Aktuelles Klima	21
1.5.3.2 Paläoklima im Einzugsgebiet des Wādī Dana	21
1.5.4 Rezente Verwitterung im Einzugsgebiet des Wādī Dana	23

1.5.5	Sedimentakkumulation vor Aufnahme der anthropogenen Bewässerung	23
1.5.6	Ermittlung der Mächtigkeit der Oasenablagerungen	24
1.5.6.1	Untersuchungsverfahren	25
1.5.6.2	Ergebnis der seismischen Untersuchungen	29
1.5.7	Erosion	33
1.5.8	Auswirkungen der tektonischen Bewegungen auf den Oasenbetrieb	37
2.	SEDIMENTOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN DER ANTHROPOGENEN ABLAGERUNGEN DER SABÄISCHEN BEWÄSSERUNGSKULTUR	39
2.1	Sedimentablagerungen im Stauraum	39
2.2	Sedimentation in den Kanälen	41
2.3	Sedimente der bewässerten Feldflächen	43
2.4	Zielsetzung der Sedimentuntersuchungen	44
2.5	Resultate der verschiedenen Laboruntersuchungen	45
2.5.1	Salzgehalt (Chloride)	45
2.5.2	pH-Wert	46
2.5.3	Kalkgehalt	46
2.5.4	Humusgehalt	47
2.5.5	Lagerungsdichte	48
2.5.6	Nutzbare Feldkapazität	48
2.5.7	K _f -Wert	49
2.5.8	Radiokohlenstoffbestimmung (C ¹⁴ -Methode)	50
2.5.9	Pollenanalyse	53
2.5.10	Schwermineralanalyse	54
2.6	Beschreibung und Korngrößenanalysen der Nord- und Südoasenprofile	56
2.6.1	Profil 1	57
2.6.2	Profil 2	61
2.6.3	Profil 3	63
2.6.4	Profil 4	66
2.6.5	Profil 5	69
2.6.6	Profil im Hauptverteiler	70
2.6.7	Profil 6	71
2.6.8	Profil 7	73
2.6.9	Profil 8	74
2.6.10	Profil 9	76
2.7	Zusammenfassende Beschreibung der Bewässerungssedimente	78
3.	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	81
3.1	Entwicklung der westlichen Südoase (aufgrund der Sedimentuntersuchungen)	81
3.2	Entwicklung der westlichen Nordoase (aufgrund der Sedimentuntersuchungen)	84
3.3	Die Entwicklung des Wādi Ġufayna	90
3.4	Datierung und Betriebsdauer der sabäischen Wasserkultur	92
3.5	Ursachen für den Verfall der antiken Wasserkultur Märib	95

Vorbemerkung des Herausgebers

Winfried Wagner hat sich im Zusammenhang mit seinen geologischen und geomorphologischen Untersuchungen an den antiken Oasen von Märib als erster der Datierungsfrage angenommen. Sein Hauptkriterium ist dabei die Altersbestimmung aufgrund der Sedimentmächtigkeiten und der daraus resultierenden Sedimentationsrate, ein aus den Überflutungsintervallen gewonnenes arithmetisches Mittel. Mit herangezogen wurden auch andere Analyseverfahren, die aber eine sekundäre Rolle spielen. Bei seinen neuerlichen Forschungen hat sich W. Wagner ausschließlich auf Radiokarbon-Tests gestützt, wofür bislang allerdings noch keine Ergebnisse vorliegen.

W. Wagner hat bei seiner Methode historische Fixpunkte eingegliedert, um feststehende Daten als Ausgangsstationen zu benutzen, und gelangt zu erstaunlich hohen Werten. Daß bereits im 3. Jahrtausend v. Chr. in Märib eine geregelte künstliche Bewässerung existiert habe, ist schon von Brunner vermutet worden. Wagner setzt die beiden monumentalen wassertechnischen Bauanlagen, Bau A und Bau B, in die Mitte resp. zweite Hälfte des 3. vorchristlichen Jahrtausends. Eine solche Zeitstellung erscheint angesichts der jüngeren Forschungsergebnisse bei prähistorischen Grabungen anderer Nationen durchaus nicht befremdlich. Dennoch müssen wir wohl bei dem gesamten Komplex der Altersbestimmung südarabischer Kulturgüter in Rechnung stellen, daß bei allen bisherigen Resultaten das letzte Wort noch nicht gesprochen ist.

Vorwort

Für die Unterstützung der vorliegenden Arbeit möchte ich meinen herzlichen Dank aussprechen: Herrn Prof. Dr. H. Zakosek für die Themenstellung, die fortlaufende fachliche Betreuung und Diskussionsbereitschaft,

Herrn Prof. Dr. W. Meyer für die freundliche Übernahme des Korreferates, den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Landwirtschaftlichen Wasserbau und Kulturtechnik sowie des Institutes für Bodenkunde, deren Unterstützung ich in Anspruch nehmen konnte, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. M. Schaloske, der die Arbeit durch Gesprächsbereitschaft und fachliche Anregungen gefördert hat.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des von der Stiftung Volkswagenwerk dankenswerterweise unterstützten Forschungsvorhabens „Antike Technologie“ durchgeführt.

Herrn Prof. Dr. J. Schmidt vom Deutschen Archäologischen Institut als Leiter des Forschungsprojektes und Herrn Prof. Dr. H. Radermacher vom Lehrstuhl für Landwirtschaftlichen Wasserbau und Kulturtechnik als Leiter der naturwissenschaftlichen Sektion sage ich ebenfalls meinen Dank an dieser Stelle.

Allen Angehörigen des Institutes für Bodenkunde danke ich herzlich für die angenehme Zusammenarbeit.

Verzeichnis der Abbildungen und Tafeln

ABBILDUNGEN

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1 Lageplanskizze des großen Dammes von Mārib und der älteren Wasserwirtschaftsbauten im Wādī Dāna 2 Geologische Formationen Arabische Republik Yemen 3 Luftströmung über Arabien im Sommer 4 Luftströmung über Arabien im Winter 5 Höhendigramm Hodeida-Ṣanaʿā-Mārib 6 Die Klimazonen des Yemen 7 Niederschlagsverteilung und Lage des Einzugsgebietes des Wādī Dāna 8 Klimawechsel im Sudan von 20000 BP bis heute 9 Geologische Karte des Einzugsgebietes des Wādī Dāna 10 Geologische Kartenskizze des Untersuchungsgebietes mit der Lage wichtiger Bauten und Lokalitäten vor Aufnahme der Bewässerung 11 Idealisierter Schnitt durch den Untergrund zur Veranschaulichung des Verlaufs der direkten und der refraktierten Welle 12 Nordoase Schnitt 1 13 Nordoase Schnitt 2 14 Nordoase Schnitt 3 15 Nordoase Schnitt 4 16 Projektion des seismisch erkennbaren Untergrundes der Schnitte 1 bis 4 17 Lageplanskizze der Baukomplexe S 6 und S 5 18 Beziehung zwischen der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit in einem Gewässer und gleichkörnigen Sedimenten 19 Schwermineralgewichtsprozent der Sedimentbänke Profil 4 | <ol style="list-style-type: none"> 20 Schwermineralgewichtsprozent der Sedimentbänke Profil 9 21 Schwermineralsummendiagramm der Sedimentbänke Profil 4 22 Schwermineralsummendiagramm der Sedimentbänke Profil 9 23 Korngrößenverteilung in Profil 1 24 Korngrößenverteilung in Profil 2 25 Korngrößenverteilung in Profil 3 26 Korngrößenverteilung in Profil 4 27 Korngrößenverteilung in Profil 5 28 Korngrößenverteilung des Profils im Hauptverteiler 29 Korngrößenverteilung in Profil 6 30 Korngrößenverteilung in Profil 7 31 Korngrößenverteilung in Profil 8 32 Korngrößenverteilung in Profil 9 33 Nord-Süd-Schnitt durch die westliche Südoase 34 Sedimentmächtigkeiten der verschiedenen Betriebsperioden in den Profilen 1 und 2 35 Projektion der Oasenoberfläche der Nordoase in eine Ebene (Abstand der einzelnen Schnitte 2 km) 36 Sedimentmächtigkeiten der Betriebsperioden I–IV im Schnitt 1 37 Sedimentmächtigkeiten der Betriebsperioden I–IV im Schnitt 2 38 Sedimentmächtigkeiten der Betriebsperioden I–III' im Schnitt 3 39 Sedimentmächtigkeiten der Betriebsperioden I–III' im Schnitt 4 40 Zuordnung der Bauwerke und Sedimente 41 Prinzipskizze der Anlage S 6 |
|---|--|

TAFELN

- 1 Luftbild der Oase von Mārib
- 2 a Fundament des älteren Südbaues S 3, im Hintergrund Südbau S 1
b Felsriß im Tosbecken Südbau S 1
c Bruchstufe des Ġabal Balaq al-Qiblī am Steilabfall zum Becken der innerarabischen Wüste
d Heutiges Mārib (Ansicht des Tells vom Wadi)
- 3 Topographische Karte des Oasenuntergrundes der westlichen Nordoase
- 4 a Terrassenfelder im Hochland
b Beim Erdbeben 1982 zerstörtes Haus in Mārib
c Schnittstelle zweier tektonischer Störungssysteme
- 5 a Geschichtete Stauraumsedimente mit zyklischer Rotfärbung
b Stauraumsedimente am Damm. In der Bildmitte ist diagonal die Steinstückung der wasserseitigen Dammoberfläche während der Periode I zu erkennen
c Kleinrippeln in einem schluffigen Kanal-sediment
- 6 a Der westliche Oasenteil, aufgenommen vom Ġibāl Daš al-Hašab
b Lage der Sedimentprofile und Radiocar-bonproben
- 7 a Profil P 1: rötliche Sedimente des „al-Mabnā“-Systems überlagern die älteren Hauptverteiler-Sedimente (siehe Markie-rung)
b Profil P 3: Oasenbasis mit Wechsellage-rung: Kies – Oasensediment (untere Bewässerungsterrasse)
c Profil P 5: helle Kalkanreicherungen um die Schichtfugen
- 8 a Sandige Ablagerungen im Hauptverteiler
b Profil P 9
c Substituierter Baum im Oasensediment
d Gradierte Sedimentschichten in der Nord-oase
- 9 a Trockenrisse mit Prismenbildungen an der Oberfläche der Nordoase
b Kalksteine an der Absperrung des Wādī Ġufayna
c Kalkgerölle auf Basalt als Beweis für Wadiverlauf
- 10 Entstehung des Wādī Ġufayna

Glossar der wichtigsten geologischen und geomorphologischen Ausdrücke

Bewässerungsbauwerke

N 1–N 4

S 1–S 6

Die von der Arbeitsgruppe der Universität Bonn gewählte Bezeichnung der Bewässerungsbauwerke N 1–4 und S 1–6 orientiert sich an funktionellen Gesichtspunkten. Mit dem Buchstaben N gekennzeichnete Bauwerke bewässerten nach heutigen Erkenntnissen die Nordoase, solche mit S versehenen die Südoase. Die arabischen Ziffern kennzeichnen für jeden Oasenteil die z. Z. sichtbare zeitliche Abfolge der Bewässerungsbauwerke, wobei N 1 oder S 1 das jeweils jüngste Bauwerk darstellen und N 4 bzw. S 6 das jeweils älteste. Es muß allerdings darauf hingewiesen werden, daß lediglich die Auslaßbauwerke N 1 und S 1 sowie N 2 und S 2 eine Funktionseinheit mit geschlossenem Damm bildeten. N 4 steht in keinem funktionellen Zusammenhang mit S 4, sondern liegt topographisch tiefer und ist daher älter. Aus diesem Grunde mußte ein von der Lage noch unbekanntes Bauwerk N 3 und wie sich im Verlauf der Forschungen herausstellte, ein weiteres Bauwerk N 3' postuliert werden.

Dies zeigt die Schwierigkeiten bei der Festlegung einer Bezeichnung der Bauwerke. Wird ein zusätzliches Bauwerk entdeckt, das höhenmäßig zwischen zwei bereits benannten steht, müßte die ganze numerische Abfolge für die jeweilige Oasenhälfte verändert werden.

Gleiches gilt aber ebenfalls für die alphabetische Bezeichnung derselben Bauwerke durch die Mitarbeiter des Deutschen Archäologischen Institutes. So entspricht Bau A dem Bauwerk N 4 und Bau B 1 und B 2 den Bauwerken S 6 und S 5.

Bewässerungsperioden VI–I

Die mit römischen Ziffern bezeichneten Perioden stellen die Zeitabschnitte dar, während derer die Bewässerung mit den korrespondierenden Bewässerungsbauwerken 6 bis 1 erfolgte.

Bewässerungsperiodenwechsel

Sie kennzeichnen das Funktionsende der Bewässerungsbauwerke sowie der entsprechenden Bewässerungsperiode. Es folgt der Neubau der zentralen Bewässerungsbauwerke mit gleichzeitiger Dammerhöhung und dem Neubeginn der nachfolgenden Bewässerungsperiode.

Buhnenprinzip

Hierbei werden Dämme bis in den Bereich des Stromstrichs gebaut. Das Wasserentnahmebauwerk steht am Buhnenkopf im Stromstrich.

Deflation

Dies ist die ausblasende Wirkung des Windes.

Korrasion

So nennt man die durch den vom Winde bewegten Sand bewirkte

	Abschleifung und Abscheuerung von Gesteinsoberflächen. Korrasion und Deflation ergeben zusammen die äolische Abtragung.
Sayl	Oberflächenabfluß im Wadi zur Regenzeit
Sedimentbänke	Die Summe mehrerer Sedimentschichten wird als Sedimentbank bezeichnet. Sedimentbänke sind im Durchschnitt 20 bis 80 cm mächtig (vgl. Taf. 7a). Sie sind durch deutliche, meist hellverfärbte Schichtfugen voneinander getrennt.
Sedimentschichten	Hierunter werden die gradierten Ablagerungen verstanden, die mit einem einmaligen Bewässerungsereignis in Verbindung stehen. Sie besitzen eine Mächtigkeit zwischen 0,6 und 9,5 mm.
Situationen I bis III	Die Situationen I bis III beschreiben die verschiedenen Verläufe des Wādī Dana vor und nach der Umlenkung durch einen Basaltstrom.

Diverse Abkürzungen

a	= annum
BP	= Before Present
d	= dies
lS	= lehmiger Sand
uS	= schluffiger Sand
suL	= sandig schluffiger Lehm
uL	= schluffiger Lehm
U	= Schluff
sU	= sandiger Schluff
tU	= toniger Schluff
uT	= schluffiger Ton
y	= year

1. Einleitung

1.1 DIE BEDEUTUNG SÜDARABIENS IN DER ANTIKE

Der Südwesten der Arabischen Halbinsel war in der Antike wegen seines legendären Reichtums als „Arabia felix“ bekannt. So wird schon im Alten Testament im Buch der Könige berichtet, daß die Königin von Saba mit kostbaren Geschenken im Überfluß zu einem Treffen mit König Salomon angereist sei.

Die Ursache des sagenhaften Reichtums Südarabiens lag im Handel mit Weihrauch und Myrrhe. Diese beiden aromatischen Baumharze gehörten zu den begehrtesten Rohstoffen der antiken Welt, weil sie von den Völkern bei kultischen Handlungen – eine Tradition, die auch in das Christentum Eingang gefunden hat – verwendet sowie zu medizinischen und pharmazeutischen Zwecken genutzt wurden.

Da die beiden Pflanzenarten nur in räumlich begrenzten Gebieten im Süden der Arabischen Halbinsel und im Somaliland wuchsen, besaßen die südarabischen Staaten aufgrund ihrer geographischen Lage die Kontrolle über die Karawanenstraßen, die im Landesinneren zwischen dem Gebirge und der Wüste Rub' al-Khālī verliefen und auf denen außerdem Handelsgüter aus Afrika und Indien in die Staaten des Mittelmeerraumes transportiert wurden.

Im Landesinneren sind die klimatischen Bedingungen, aufgrund der niedrigeren Durchschnittstemperatur und der geringen Luftfeuchtigkeit, für solch lange und strapaziöse Reisen wesentlich angenehmer als in der Küste des Roten Meeres.

An den Kreuzungspunkten der Handelswege, von denen die Weihrauchstraße die bekannteste war, entstanden die Versorgungsstationen und die Hauptstädte der alten Reiche.

Obwohl im ariden Klimabereich liegend, erlangte Mārib, die am Wādī Dana gelegene Hauptstadt des Sabäerreiches, schon früh und für lange Zeit die größte Geltung, weil dort die verschiedenen Karawanenstraßen zusammenliefen. Zudem profitierte die antike Oase Mārib von ihrer Lage am Austritt des Wādī Dana aus dem Gebirge in das Wüstenbecken.

Das Wadi (Größe des Einzugsgebietes: ca. 8200 qkm) entwässert in der Regel zuweimal jährlich während der beiden Regenzeiten einen großen Teil des yemenitischen Randgebirges nach Osten zur Wüste Rub' al-Khālī.

Mit den Einnahmen aus der Kontrolle der Handelswege wurde ein leistungsfähiges Bewässerungssystem aufgebaut, das die landwirtschaftliche Grundlage der sabäischen Kultur bildete und die Versorgung der Bevölkerung und der Karawanen mit Nahrungsmitteln garantierte.

Die Aufgabe der Oase im 7. Jh., nach einer Betriebsdauer von weit über 2000 Jahren, kann mit dem Verfall des gut organisierten Gemeinwesens, der stetigen Abnahme des Bedarfs an südarabischen Aromaten, dem Niedergang der bäuerlichen Kultur durch die Vernachlässigung der Bewässerungssysteme und dem rapiden Rückgang des Handels auf den alten Karawanenstraßen im Binnenland in Verbindung stehen.

Die Verschiebung der Transportwege und der damit verbundene Rückgang des Karawanenhandels auf der Weihrauchstraße wurde bislang immer als Grund für den Verfall der alten Hochkulturen am Rande der Wüste angeführt.

Mittlerweile liegen aber Indizien vor, daß auch natürliche Ursachen tektonischer und/oder klimatischer Art zum Untergang des sabäischen Staates und der Bewässerungsanlage Mārib geführt haben können. Die Versorgung der Bevölkerung und der Karawanen war nach den ermittelten Ergebnissen nicht mehr gewährleistet und machte die Verlagerung der Transporte auf den Seeweg notwendig.

1.2 FORSCHUNGSSTAND

Über eines der bedeutendsten technischen Bauwerke der antiken Welt, den Damm von Mārib, dessen Zerstörung etwa um 575 n. Chr. im Koran als Strafe Gottes erwähnt wird (Sure 34,15 f.), sowie die Wasserwirtschaft und Agrikultur lagen bis 1979 nur wenige wissenschaftlich gesicherte Erkenntnisse vor.

Der berühmte Damm von Mārib und die dazugehörigen, noch heute erhaltenen Auslaßbauwerke gehen auf das 6. Jahrhundert v. Chr. zurück. Die beiden Bauherren der Anlage, die Mukarribe von Saba, Sumku'alīy Yanūf und sein Sohn Yīṭa' 'amar Bayyin, haben sich an der Südschleuse in vier Felsinschriften verewigt.

Zu Beginn des Jahres 1979 nahm das Deutsche Archäologische Institut mit einer ersten Kampagne unter Leitung von Prof. J. Schmidt in der Umgebung von Mārib die Arbeit mit Schwerpunkt „Antike Technologie“ auf. Ende 1979 folgte die zweite Kampagne.

Während der ersten beiden Kampagnen wurde ein vierteiliges Arbeitsprogramm verfolgt:

1. Geographischer Survey.
2. Archäologischer Survey.
3. Terrestrische und photogrammetrische Aufnahmen der zur Wasserwirtschaft gehörenden Großbauten.
4. Anfangsstudien zur Bewässerungstechnik und zur Morphologie der antiken Oasen.

Die Forschungsergebnisse sind in Band I der Archäologischen Berichte aus dem Yemen (ABADY I) zusammengefaßt.

Seit der dritten Kampagne Ende 1980 verlagerte sich das Interesse auf den funktionellen Aspekt der Anlagen, auf die Kanalsysteme und die antiken Anbauflächen des Bewässerungssystems sowie den hinter dem Damm befindlichen Stauraum.

Einen großen Teil der Forschungen während der 3. und 4. Kampagne (Ende 1981) beanspruchten die geomorphologischen Untersuchungen, deren Ergebnisse in ABADY II vorgestellt wurden¹.

Mit Hilfe dieser Untersuchungen konnte Brunner Datierungskriterien aufstellen und die Art der Feldbewirtschaftung ableiten. Mit der Aufnahme stratigraphischer Profile der antiken Stauraumsedimente unweit des Dammes wurde das Ziel verfolgt, durch relative Einordnung und detaillierte Kartierung aller vorhandenen Diskordanzen Rückschlüsse auf Dammbrüche und Beschädigungen zu ziehen.

Dank der Förderung durch die Stiftung Volkswagenwerk konnte seit 1983 eine Intensivierung der Feldarbeit erreicht werden.

Die naturwissenschaftlich-wasserwirtschaftlichen Forschungen wurden im wesentlichen auf den Bewässerungsflächen der Nord- und Südoase durchgeführt.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Forschungen des Deutschen Archäologischen Instituts wurde der naturwissenschaftliche Bereich dieses interdisziplinären Vorhabens in einzelne Fachgebiete aufgeglie-

1 U. Brunner, Die Erforschung der antiken Oase von Marib mit Hilfe geomorphologischer Untersuchungs-

methoden. Archäologische Berichte aus dem Yemen II, 1983, 124 S.

dert. An dem Projekt beteiligte sich in der 5. (9/83 bis 1/84) und 6. (10/84 bis 2/85) Kampagne die Universität Bonn unter Leitung von Prof. H. Radermacher mit den Fächern Bodenkunde, Geologie, landwirtschaftlicher Wasserbau und Geodäsie.

1.3 PROBLEMSTELLUNG

Der Abfluß des gewöhnlich während der beiden Regenzeiten wasserführenden Wādī Dana bot für die Bewohner des im ariden Klimabereich liegenden antiken Mārib nahezu die einzige Möglichkeit, das für die Landwirtschaft notwendige Wasser zu erhalten.

Der die Natur beobachtende Mensch bemerkte sicherlich schon früh, daß in dem steinig und unfruchtbaren Gebiet am Rande der yemenitischen Wüste die Vegetation in den Sedimenten der Flüsse und Seen besser gedieh. Vielleicht wurden von der Zuflüssen des Wādī Dana kleine Schwemmkegel in das Wadi vorgeschüttet, die keinen ungehinderten Abfluß mehr erlaubten. So könnten natürliche Stauseen entstanden sein, die als Vorbild für das spätere Bewässerungsverfahren gedient haben.

Den Beginn der Bewässerungskultur der Sabäer bildete sicherlich der Anbau von Nutzpflanzen im Wadibett oder in den Seen nach Abklingen des Abflusses bzw. Versickern des Wassers.

Der nächste Schritt war die Errichtung von Erddämmen bis in den Stromstrich des Wādī Dana, die einen Teil des saisonalen Abflusses auf Felder neben dem Flußbett leiteten. Mit dieser Methode, die bis auf den heutigen Tag Anwendung findet, begann die gesteuerte Bewirtschaftung von allerdings noch kleinen Anbauarealen.

Durch das regelmäßige Überfluten von unfruchtbaren Geröllflächen, die wahrscheinlich von kleinen Wällen umgeben waren, mit sedimenthaltigem Wasser entstanden Sedimentfallen, die nach einigen Jahren eine für Ackerbau ausreichende Sedimentmächtigkeit aufwiesen.

So konnte die potentielle Nutzfläche zwar langsam aber stetig erweitert werden. Die wachsenden Anbaugebiete machten aber auch eine gezieltere Bewässerung mit geplanter Wasserverteilung bei gleichzeitig größerem Wasserbedarf notwendig.

Der „legendäre Reichtum“ der Sabäer ermöglichte ihnen die aufwendige Konstruktion von Ableitungsbauwerken aus Kalkquadern nach dem Bühnenprinzip auf anstehenden Felsen im Stromstrich. Damit war zum ersten Mal ein koordiniertes Betriebssystem, bestehend aus Ableitungsbauwerk, Zuleitungskanal und Anbauflächen, notwendig. Die solide Ausführung der noch heute erhaltenden Fundamente des ältesten bekannten Bewässerungsbauwerkes S 6 läßt aber schon zu diesem frühen Zeitpunkt auf akkumulierte Erfahrung und lange Tradition der Wasserwirtschaft schließen. Von diesem Ableitungsbauwerk ausgehend, wurde während der frühesten bekannten Betriebsperiode VI eine Fläche südlich des Wadis, die sogenannte Südoase, bewässert (vgl. Abb. 1).

Maßgeblichen Einfluß auf das Betriebssystem hatte neben dem Wasserdargebot auch der mitgeführte Sedimentanteil des Bewässerungswassers, der bei jeder Bewässerung eine kontinuierliche Aufsedimentation der Feldflächen verursachte. Die Gesamtmächtigkeit der akkumulierten Oasen-Sedimentablagerungen beträgt nahezu 20 m. Um trotz dieses Phänomens die ausreichende Wasserversorgung der Nutzflächen mit freiem Wasserspiegelgefälle zu gewährleisten, mußten nach bestimmten Zeitabständen die Abzweigbauwerke flußaufwärts verlegt oder am gleichen Standort erhöht werden. Diese für die Bewässerung der Oasenflächen elementare Notwendigkeit und die im Laufe der Zeit erworbene technische und wasserwirtschaftliche Erfahrung führten letztendlich zum Bau des Staudamms von Mārib (vgl. Abb. 1). Mit der Vollsperrung des Wadis, der Erhöhung des Wasserspiegels und der gleichzeitigen Ableitung des Wassers zur Nord- und Südoase wurde erstmals in der Bewässerungsgeschichte Māribs eine funktionelle Abhängigkeit der Oasenhälften geschaffen.

Am Standort des Dammes durchbricht das Wādī Dana auf einer etwa 300 m breiten Störungszone die

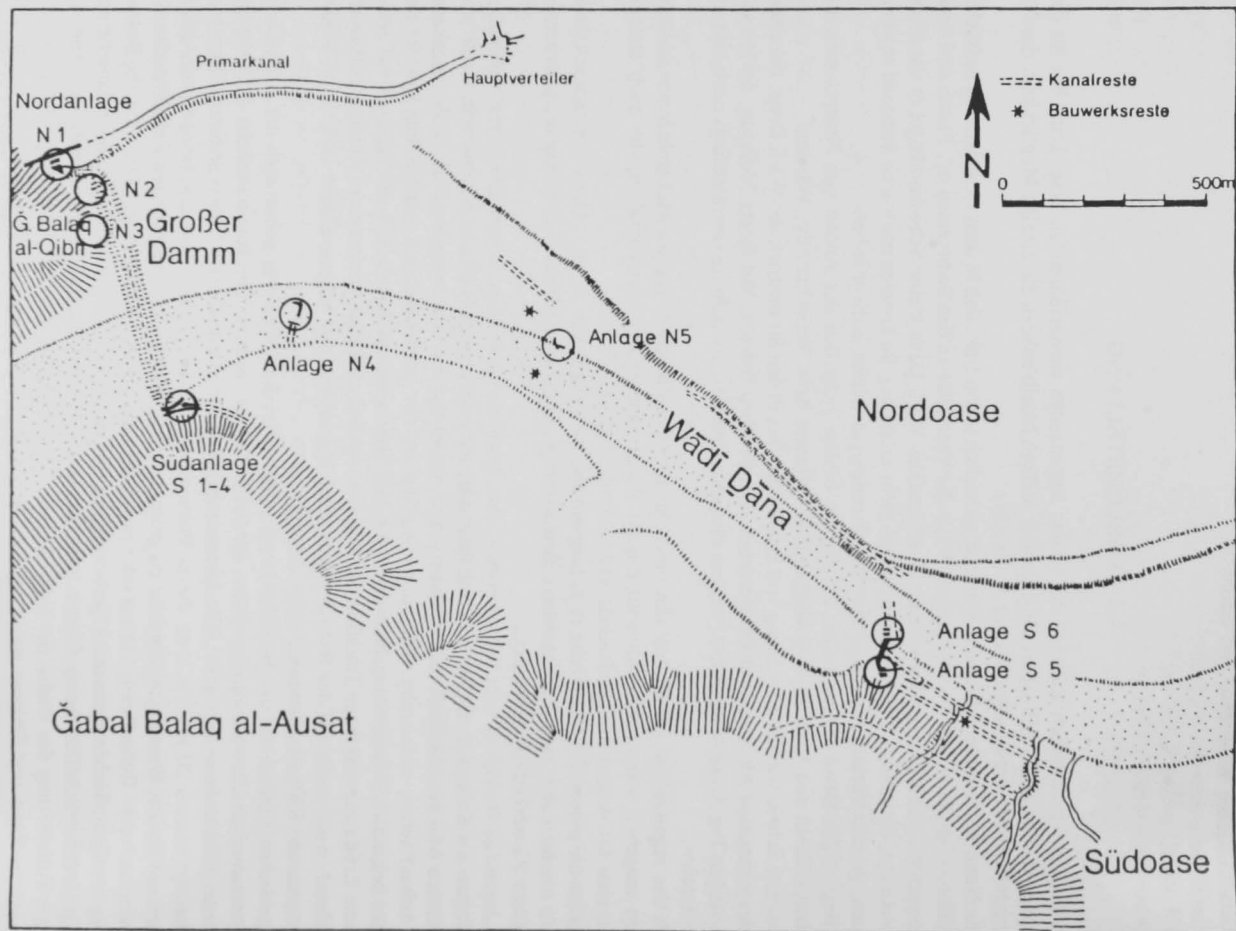


Abb. 1. Lageplanskizze des großen Dammes von Mārib und der älteren Wasserwirtschaftsbauten im Wādī Dāna⁶².

hochaufragenden mesozoischen Kalke des Deckgebirges, bevor es in die weite Ebene der Wüste austritt. Diese Konzentration der Abflußspende begünstigte die Anlage eines in der letzten Periode etwa 680 m langen und etwa 20 m hohen gestickten Erddammes. Am jeweils südlichen und nördlichen Dammende entstanden auf dem anstehenden Felsen des Gebirgsfußes mächtige Auslaßbauwerke (der Nordbau N und der Südbau S) aus Kalkquadern, von denen über viele Jahrhunderte je ein Hauptkanal das Wasser auf die Nord- bzw. Südoase führte, die zusammen eine maximale Flächenausdehnung von ca. 7200 ha erreichten. Die Nordoase hatte eine West-Ost-Erstreckung von ca. 11 km und für die Bewässerung des östlichen Endes der Südoase mußte vom Südbau ausgehend eine Gesamtstrecke von 21 km überwunden werden. Doch selbst in dieser Entfernung vom Auslaßbauwerk wurden die Feldflächen mit Bewässerungswasser versorgt. Dies beweist die hochstehende Technologie sowie die perfekte Planung und Koordination des Bewässerungssystems.

Die gesamte Dammkonstruktion, inklusive der beiden Auslaßbauwerke, diente ausschließlich der Wasserspiegelerhöhung des zweimal jährlichen auftretenden Abflusses des Wādī Dana bis auf ein Niveau, das die Bewässerung aller Oasenteile mit freiem Wasserspiegelgefälle und die schnelle und direkte Verteilung des Abflusses gestattete. Einen Stausee im heutigen Sinne, der eine Speicherung und längerfristige Wassernutzung ermöglicht hätte, gab es nicht.

Da jeder Sayl unverzüglich eingelassen werden mußte, hatte das System Tag und Nacht bereit zu sein. In den Auslaßbauwerken wurden die Öffnungen stets unverschlossen gehalten, so daß die mit Hilfe einer Hochwasserentlastung festgelegte Wassermenge in das Kanalnetz gelangte.

Die Hauptzuleitungskanäle endeten auf den Oasen in massiven Bauwerken aus Kalksteinquadern. Diese Hauptverteiler besaßen die Aufgabe, das Wasser je nach Bedarf durch verschiedene verschleißbare Auslässe in das Primärkanalnetz des eigentlichen Verteilungssystems einzuspeisen. Die Primärkanäle versorgten definierte Areale und deren orthogonal angelegtes Kanalnetz, dessen Strukturen im Luftbild und auch an der Oasenoberfläche noch relativ gut zu erkennen sind (Taf. 1).

Luftbilder der antiken Oase von Märib zeigen im zentralen Bereich der Nordoase eine relativ gleichförmige Oberfläche, die an den Rändern durch Gully-Erosion zu den Vorflutern hin ausgefrant ist. Deutlich ist das orthogonale Kanal- und Feldwallsystem der letzten Periode zu erkennen. Der unterschiedliche Grauton entsteht durch geringe Differenzen in der Höhenlage, aber auch durch den Schutt der ehemaligen Verteilerbauwerke. Die Kanäle umschlossen in der Regel Feldflächen von 1–2 ha Größe, welche von einem Kanal durch ein wahrscheinlich regulierbares Verteilerbauwerk überflutet wurden. Die vom Wadiwasser mitgeführten Sedimente besaßen einen bedeutenden Einfluß auf die Funktionsfähigkeit des Staudammes. Sie sedimentierten weitgehend im Stauraum, weil dort die Fließgeschwindigkeit und die Transportkraft des Wadis beim Auftreffen des Abflusses auf das im Stauraum stehende Gewässer erheblich zurückgingen. Lediglich die Schwebstoffe wurden auf die Oase transportiert und dort abgelagert.

Schließlich füllten die Ablagerungen des Wadis den Stauraum so vollständig aus, daß nur noch der nun wesentlich erhöhte Stromstrich zu den beiden Auslässen vorhanden war. Insbesondere in diesem Zustand mit reduzierter Retentionswirkung bei aufsedimentiertem Stauraum steigerte sich bei Hochwasserereignissen im Wādī Dana die Dammbruchgefahr. Inschriften belegen, daß es sogar mehrfach zu Dammbrüchen kam. Durch den Wegfall der Stauwirkung wurde die Fließgeschwindigkeit des zu den Oasen strömenden Wassers vergrößert und auch größere Kornfraktionen auf die Feldflächen transportiert und abgelagert.

Die Sedimente auf den bewässerten Oasenflächen wiesen also für jede Betriebsperiode (Damm und Auslaßbauwerke in entsprechender Höhenlage) eine kontinuierliche Veränderung von liegenden feinen zu hangenden gröberen Korngrößen auf. Natürlich mußten wegen der Aufsedimentation der Bewässerungsgebiete von Zeit zu Zeit auch die Kanäle und die Verteilerbauwerke des Betriebssystems auf der Oase auf höherem Niveau neukonstruiert werden.

Mit jeder Erhöhung des Dammes und der Auslaßbauwerke zur Erhaltung des freien Wasserspiegelgefäl-

les auf die Nutzflächen wurde auch der Stauraum vergrößert und es kam auf der Oase zu einem erneuten Sedimentationszyklus von feinkörnigen und grobkörnigen Ablagerungen.

Mit jeder rhythmischen Änderung der Ablagerungsbedingungen läßt sich eine definierte Periode des Funktionssystems „Damm-Auslaßbauwerke“ korrelieren, so daß sich aus der Stratigraphie der Oasen-sedimente und deren geodätischen Höhen die Anzahl der Betriebsperioden, die Höhenlage von Damm und Auslaßbauwerken und deren relatives Alter rekonstruieren lassen.

Das eigentliche Problem war allerdings die absolute Altersdatierung des Bewässerungssystems, welches mit der Entwicklung der Bewässerungskultur unverkennbar verknüpft war.

So standen als Hilfsmittel zwei auf das Bewässerungssystem bezogene absolute Zeitmarken zur Verfügung:

1. Die Aufgabe der Oase und die endgültige Zerstörung des Dammes, die im Koran als Strafe Gottes erwähnt ist, wird gegen Ende des 6. Jahrhunderts (ca. 575 n. Chr.) angenommen, zur Zeit der Eroberung durch die Perser.
 2. Eine in den Fels am Südbau gemeißelte Inschrift dokumentiert im letzten Drittel des 6. Jh. v. Chr. (um 510²) die Neuerrichtung des zweitjüngsten Südbaues S 2. Der Südbau S 2 war gleichzeitig das Wasserentnahmebauwerk der vorletzten Betriebsperiode II. Die Existenz zweier älterer Südbaufundamente im Bereich des Dammes beweist, daß die Anfänge der Bewässerung mit Hilfe einer Wadivollabspernung noch weiter in die Vergangenheit zurückreichen.
- Insgesamt sind sechs zeitlich aufeinander folgende Betriebsperioden (VI–I) der Bewässerungskulturen bekannt.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es, durch eingehende Sedimentuntersuchungen die verschiedenen Entwicklungsperioden der Oase zu rekonstruieren, sowie die relative und absolute Altersstellung der Oasen-sedimente und der Betriebsperioden zu definieren.

1.4 NATURRÄUMLICHE BEDINGUNGEN SÜDARABIENS

1.4.1 Geographische Position des Yemen

Die Arabische Republik Yemen (Hauptstadt Šana'ā'), ein Staat im Südwesten der Arabischen Halbinsel am Roten Meer, liegt zwischen 12°40' und 17°30' nördlicher Breite sowie 42°40' und 46° östlicher Länge. Im Norden wird der Yemen von Saudi-Arabien und im Süden und Südosten von der Demokratischen Volksrepublik Yemen (Südyemen) begrenzt.

Die im Osten durch die Rub'al-Khālī verlaufende Staatsgrenze ist noch nicht eindeutig festgelegt. Das Land besitzt eine Grundfläche von ca. 195 000 km² und ist mit 8,6 Mio. Einwohnern der bevölkerungsreichste Staat der Arabischen Halbinsel. 1,4 Mio. Yemeniten leben (≈ 16%) als Gastarbeiter überwiegend in den Erdölstaaten³. Sie sind von größter Wichtigkeit für die Wirtschaft des Landes, weil sie Devisen erbringen. 72% aller erwerbstätigen Yemeniten sind auch heute noch in der Landwirtschaft tätig.

2 H. v. Wissmann in Aufstieg und Niedergang der römischen Welt II 9.1, 1976, S. 355.

3 H. Dequin, Arabische Republik Jemen, Wirtschaftsgeographie eines Entwicklungslandes, Riyadh, Okt. 1976, 251 S., S. 1.

1.4.2 Geologie und Tektonik des südarabischen Raumes

1.4.2.1 Präkambrium

Afrika und Arabien sind Teile eines alten konsolidierten Schildes, der ursprünglich auch im Bereich des Roten Meeres ungestört war. Im Präkambrium wurde dieser Schild von einer Regionalmetamorphose überprägt, wodurch metamorphe Schiefer und Gneise entstanden. Gleichzeitig wurde das Gebiet intensiv gefaltet, wobei zahlreiche Granitplutone aufdrangen. Dieser kristalline Untergrund wurde noch im Präkambrium eingerumpft.

Heutzutage sind die Tiefebene des Landes überwiegend Bestandteile des präkambrischen Sockels. Neben Graniten und Gneisen sind lokal auch Glimmerschiefer, Marmor, Quarzite und mafische Vulkanite vertreten.

1.4.2.2 Paläozoikum

Die Einrumpfung des präkambrischen Schildes setzte sich auch im Paläozoikum fort. Ablagerungen sind erst wieder aus dem Mesozoikum bekannt.

1.4.2.3 Mesozoikum

Im Jura waren weite Teile des Sockels abgesunken. In diesem Becken kam es durch das von Osten transgredierende Meer zur Ablagerung von fossilreichen marinen Kalken der 'Amrān-Serie.

Während die Senkungstendenz im Gebiet um Mārib nach dem Rückzug des Meeres ein vorläufiges Ende fand, wurden in der Kreide und/oder dem Tertiär in dem Becken mit der Achse Ṣana'ā'-Dhamār kontinentale Sandsteine der Ṭawīla-Gruppe sedimentiert.

Gegen Ende der Kreidezeit begannen sich im Yemen basaltische Trap-Serien in die Sedimentgesteine einzuschalten⁴ oder sie zu überlagern. Mit diesem Vorgang begann sich die stabile Verbindung des Afrikanisch-Arabischen Schildes in diesem Bereich zu lockern. Die vulkanischen Tätigkeiten verstärkten sich an der Kreide-Tertiär-Grenze. PILGER & RÖSLER⁵ sprechen von dem Vor-Rift-Stadium dieses Teils des Afro-Arabischen Blockes.

1.4.2.4 Tertiär

Im frühen Tertiär setzte sich die Entwicklung zu einem Rift-System fort. Eine mehr oder weniger starke Grabenabsenkung erfolgte in den Gebieten des Roten Meeres und im Golf von Aden⁶.

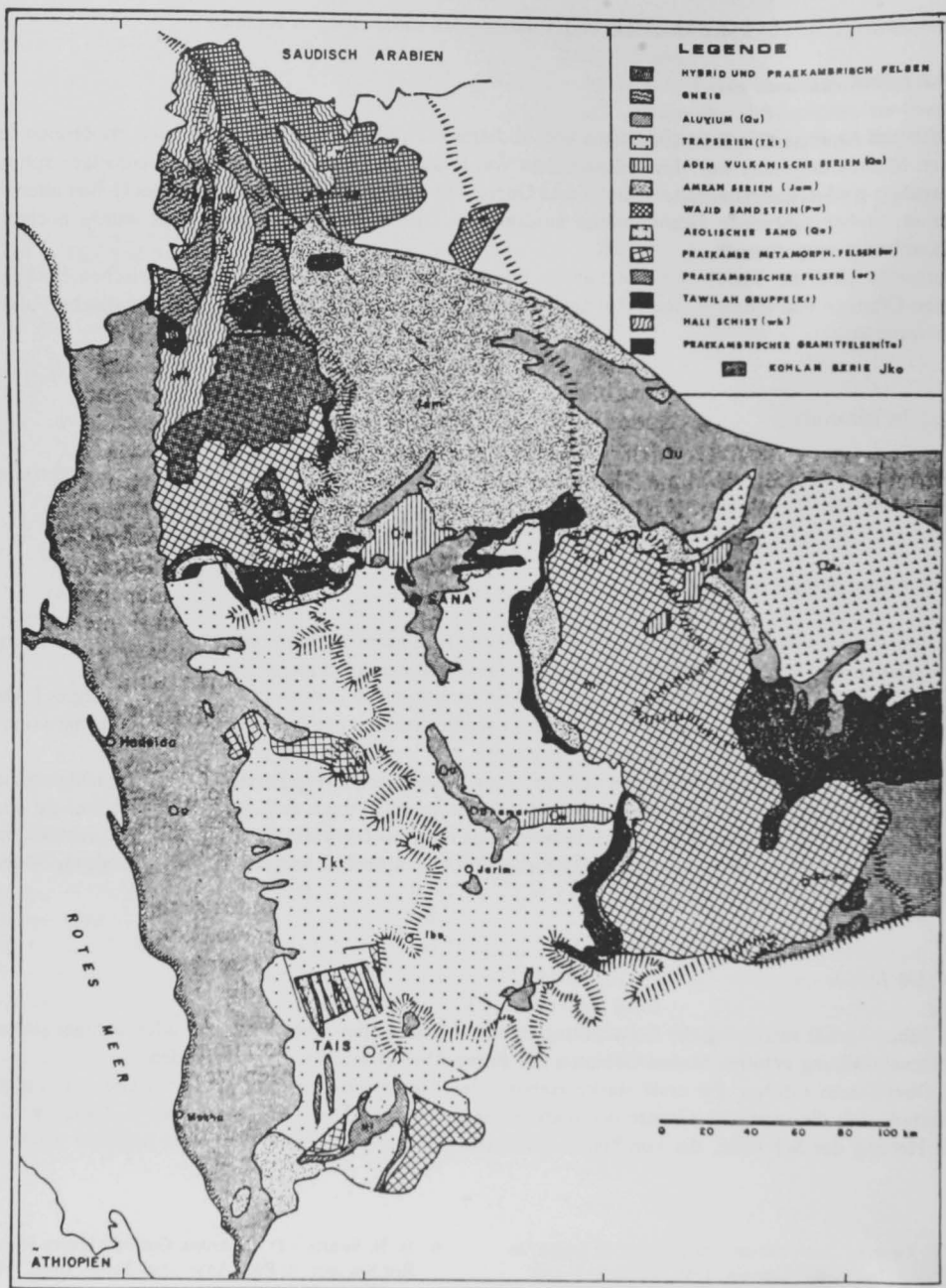
Im Ober-Eozän erfolgte die erste starke Hebung der Äthiopisch-Yemenitischen Schwelle. Als Folge verschob sich die westliche Grenze der marinen Sedimentation abrupt vom 43. zum 49. Längengrad. Die Hebung der Schwelle, die von einem weitverbreiteten alkalischen Vulkanismus begleitet wurde⁷,

4 F. Geukens, Contribution à la géologie du Jemen, in Mém. Inst. Geol. Louvain, 1960, 21, S. 117–180.

5 A. Pilger – G. Rösler, Afar between continental and oceanic rifting 1975, S. 1–25.

6 D. H. Swartz – D. D. Arden, Geologic history of the Red Sea area, in Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol., 44, S. 1621–1637, 1960.

7 P. A. Mohr, The Ethiopian rift system, in Bull. Geophys. Obs., 11, S. 1–65, 1967.

Abb. 2. Geologische Formationen Arabische Republik Yemen²¹.

kann durchaus mit dem Beginn des Sea-Floor-Spreading im Bereich des Roten Meeres im Spät-Eozän zusammengehangen haben⁸. Im Zentralen Yemen liegen die eozänen Trap-Serien⁹ auf der Mej Zir Formation, die von marinen Sedimenten des Paläozäns¹⁰ gebildet wird.

Auch im mittleren Oligozän fand eine Periode verstärkter vulkanischer Aktivität statt¹¹, die in Verbindung mit dem Wegdriften der Arabischen Platte nach NO steht¹². Spätestens ab diesem Zeitpunkt war der Afrikanisch-Arabische Schild in zwei Teile zerbrochen.

Das frühe Miozän wird durch die zweite starke Hebung der Äthiopisch-Yemenitischen Schwelle gekennzeichnet¹³.

Diese vertikale Tektonik, die mit NNW-streichenden Verwerfungen und basaltischem Magmatismus einherging, gestaltete das, zu dieser Zeit noch im Stadium eines interkontinentalen Grabens¹⁴ befindliche, Rote Meer und die yemenitische Hochebene¹⁵.

Atlantische Laven bauten Vulkane beträchtlicher Größe auf, die den Kern des yemenitischen Hochlandes bilden. In dem Becken Šana'ā'-Dhamār breiteten sich bis zu 800 m mächtige Basaltdeckenergüsse aus. Im oberen Miozän fand eine weitere Periode mit starkem innerarabischem Vulkanismus statt, die mit dem Beginn des Sea-Floor-Spreading im Golf von Aden zeitlich übereinstimmt¹⁶.

Während des Pliozäns weiteten sich die Strukturen des Roten Meeres und des Golfs von Aden zu einem breiten ozeanischen Rücken¹⁷. Dieses Sea-Floor-Spreading wurde von einer Hebung der Äthiopisch-Yemenitischen Schwelle und der Reaktivierung der Rote-Meer-parallelen miozänen Staffelbrüche des Yemens begleitet¹⁸.

1.4.2.5 Quartär

Da das Sea-Floor-Spreading im Roten Meer und im Golf von Aden bis zur Gegenwart andauert, traten auch im Quartär tektonische Beanspruchung und Vulkanismus auf. Die Hauptzentren der tektonischen Aktivität lagen zwischen Šana'ā' und 'Amrān sowie um Dhamār und Mārib weitgehend zerstört.

Die bedeutendsten Verwerfungen sind mit quartären Basalten assoziiert¹⁹ und könnten wiederbelebte präkambrische Schwächezonen der Kruste markieren. Diese Störungen durchdringen jedoch nicht die Rote-Meer-Krustenzone der NNW-streichenden Flexuren und Verwerfungen²⁰.

Das alte Becken der innerarabischen Wüste Rub'al-Khālī wurde mit Abtragungssedimenten gefüllt. Auch dies ist ein Hinweis darauf, daß das Becken seine schon im Jura begonnene Senkungstendenz wieder aufnahm und der Staffelbruch vom yemenitischen Hochland zur innerarabischen Wüste wieder aktiviert wurde.

8 R. W. Girdler – P. Styles, Two stage Red Sea floor spreading, *Nature*, 1974 c, 247, S. 7–11.

9 T. Lipparini, Contributi alla conoscenza geologica del Yemen, in *Boll. Serv. Geol. Ital.* 1954, 76, S. 93–120.

10 Geukens a.O. (s. o. Anm. 4).

11 B. Zanettin – E. Justin-Visentin, Tectonic and volcanologic evolution of the western Afar margin, in *Afar Symposium*, 1974 b, April 1–6, S. 300–309.

12 Girdler-Styles a.O. (s. o. Anm. 8).

13 B. H. Baker – P. A. Mohr – L. A. J. Williams, Geology of the Eastern Riftsystem of Africa, in *Geol. Soc. Amer.* 1972, Spec., 136, S. 67.

14 (J.) M. Illies, Kontinentaldrift – mit oder ohne Konvektionsströmungen, in *Tectonophysics*, 2, S. 521–557, 1965.

15 G. F. Brown, Eastern margin of the Red Sea and the coastal structures in Saudi Arabia, in *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1970, (A) 267, S. 75–87.

16 I. G. Gass, Implications of continental drift to the earth sciences, in *The Red Sea depression*, 2, S. 779–785, 1973.

17 Illies a.O. (s. o. Anm. 14).

18 P. A. Mohr, Ethiopian Tertiary dike swarms, in *Smithsonian Astrophys. Obs., Spec. Rep.*, 339, S. 85, 1971 a.

19 P. A. Mohr, ERTS-1 imagery of eastern Africa: a first look at the geological structure of selected areas, in *Smithsonian Astrophys. Obs., Spec. Rep.*, 347, S. 57, 1972 b.

20 Mohr a.O. (s. o. Anm. 7).

21 Dequin a.O. (s. o. Anm. 3).

1.4.2.6 Tektonik

Die Hauptleitlinien der Tektonik folgen im wesentlichen dem Roten Meer (NNW–SSW) und dem Aden-golf (WSW–ONO). Außerdem ist eine Reihe, besonders im präkambrischen Kristallin ausgebildeter Störungen von Bedeutung, die im wesentlichen NO–SW oder NNO–SSW (ost-afrikanische Richtung) streichen. Der konsolidierte kristalline Sockel ließ nur Bruchtektonik zu, so daß Horst- und Grabenstrukturen entstanden, deren Richtungen und Sprunghöhen im Gelände zu beobachten sind. Ein Beispiel dafür bildet der NNW–SSO streichende Ġabal Balaq bei Märib, ein 600 m hoher Horst aus 'Amrān-Kalken, der die ehemalige mesozoische Sedimentbedeckung belegt.

Die Hebung der Äthiopisch-Yemenitischen Schwelle erfolgte seit dem Tertiär in zwei Perioden, die offensichtlich in engem Zusammenhang mit dem Sea-Floor-Spreading des Roten Meeres standen. Beide Ereignisse könnten eine Beziehung zu der weltweiten Veränderung der Plattenbewegung besitzen, die etwa 36 million years before present im Indischen Ozean²² und 5–4 million years before present im Pazifik²³ deutlich sichtbar wurden.

Infolge der Entstehung ozeanischer Kruste im Roten Meer und im Golf von Aden wurde eine Bewegung der Arabischen Platte nordostwärts erforderlich²⁴. Die Ränder der Platte zeichnen sich deutlich im Toten-Meer-Rift, dem Golf von Aqaba, dem Roten Meer und dem Golf von Aden ab. Zusätzlich rotiert die Arabische Platte im Gegenuhrzeigersinn und öffnet das Rote Meer und den Golf von Aden²⁵. Dieser regionale Drehungsstress verursachte jene Bruchtektonik, die den weitverbreiteten Vulkanismus auf der Arabischen Platte nach sich zog²⁶.

Die Krustenausdehnung im Roten Meer und im Golf von Aden wird von der Subduktion der Lithosphäre in den Anprallgebieten der Türkei und dem westlichen Teil Irans begleitet, was in diesen Gebieten die Bildung von Gebirgsketten entlang des Randes der Arabischen Platte verursachte²⁷.

1.4.3 Böden des Yemen

Da spezielle bodenkundliche Untersuchungen aus dem Gebiet nicht bekannt sind, wird bei der Beschreibung der Böden auf die Weltbodenkarte der FAO-UNESCO 1974 zurückgegriffen.

Von Westen nach Osten lassen sich drei Zonen mit verschiedener Bodenentwicklung in Abhängigkeit von Klima und Ausgangsgestein unterscheiden:

1. Auf dem bis zu 60 km breiten Küstenstreifen am Roten Meer, der von alluvialen Sedimenten aufgebauten Tihama (vgl. Abb. 2) haben sich Yermosole gebildet.
2. In dem ca. 250 km breiten yemenitischen Hochland haben sich auf der präkambrischen und den basaltischen Gesteinen Lithosole entwickelt. Aus den nordöstlich von Šana'ā aufgeschlossenen Kalken der 'Amrān-Serien sind kalkige Yermosole entstanden.
3. Die sich anschließende weite Verebnungsfläche der Wüste besteht überwiegend aus lockeren, fluvialen Sedimenten, auch Serire genannt. Aus den alluvialen Ablagerungen der Wadis haben sich kalkige Yermosole entwickelt. Die abflußlosen Becken sind ton- und schluffreich und mit Gips oder Salz angereichert. Die Oasen besitzen in der Regel salzhaltiges Grundwasser, das bei der Bewässerung zu Salzanreicherungen im Oberboden führen kann.

22 D. P. McKenzie – J. G. Sclater, The evolution of the Indian Ocean since the late Cretaceous, in *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1971, 25, S. 437–528.

23 P. Molnar – T. Atwater, Relative motion of hot spots in the mantle, in *Nature*, 246, S. 288–291, 1973.

24 I. G. Gass, Magmatic and tectonic processes in the development of the Afro-Arabian Dome, in *Afar Depressions of Ethiopia*, 1975, S. 10–18.

25 Illies a.O. (s. o. Anm. 14).

26 Baker – Mohr – Williams a.O. (s. o. Anm. 13).

27 Illies a.O. (s. o. Anm. 14).

Die äolischen Sedimente (Ergs, Dünen) weisen wegen aktiver Sandbewegung kaum Bodenentwicklung auf. Die FAO-Karte beschreibt sie als kalkhaltige Regosole. Braune oder rote Bodenfarben sind Relikteigenschaften feuchter Klimaepochen und ziemlich weit verbreitet.

Yermosole sind Böden der ariden Klimazone. Sie entstehen in der Regel bei mittleren Jahresniederschlägen unter 20 mm, hoher potentieller Verdunstung (ca. 4000–5000 mm/a) und tiefliegenden Grundwasserstockwerken.

Vegetation ist daher kurzfristig nur nach sogenannten Jahrhundertniederschlagsereignissen möglich. Der Humusgehalt des Oberbodens beträgt im Mittel 0,5% bei Sanden, 0,8% bei Lehmen und 1% bei Tonen. Yermosole besitzen ein, selbst bei Sanden, ausgebildetes Säulengefüge²⁸. Die Trockenrisse sind häufig mit Flugsand gefüllt.

Die von den Niederschlägen mitgeführten Salzgehalte führen im Laufe der Zeit zu einer Salzanreicherung im Boden. Das Maximum der Salze liegt aufgrund von Verlagerungen und episodischen Starkregen im Unterboden. Lehmig-tonige Böden sind salzreicher und daher alkalischer als sandige.

Die verbreitetsten Verwitterungsformen im Yermosolgebiet sind die physikalischen in Form von Insolation und Salzsprengung. Chemische Lösungsverwitterung findet rezent nur in begrenztem Umfang statt, so daß braune oder rote Bodenfarben auch hier Relikte feuchterer Klimaperioden sind.

Ackerbau ist auf Yermosolen nur mit Hilfe von Bewässerung möglich. Dabei muß allerdings darauf geachtet werden, daß durch Installation eines Entwässerungssystems oder Aufbringung einer entsprechenden Wassermenge die Salze ausgewaschen werden.

Die Lithosole im Yemen sind Gesteinsböden des Hochgebirges, die sich aus präkambrischen oder basaltischen Festgesteinen entwickelt haben. Entwicklungstiefe und Verwitterungsgrad sind wegen der starken Erosion durch episodische Starkregen und Wind gering.

Die landwirtschaftliche Nutzung dieser Gebirgsböden ist häufig erst nach einer Terrassierung möglich. Regosole sind terrestrische Böden mit einem nur geringmäßigen Solum. Sie haben sich aus kalkfreiem bis kalkarmem ($< 2\% \text{ CaCO}_3$) Lockergestein entwickelt. Regosole weisen lediglich einen humusarmen Oberboden auf. Sie besitzen zumeist eine sandige Körnung und demzufolge sehr niedrige Wasser- und Austauschkapazitäten. Sie sind in der Regel stark erosionsgefährdet. Sollen Regosole landwirtschaftlich genutzt werden, bedürfen sie ständiger Düngung und der Bewässerung. Die nutzbare Feldkapazität kann vor allem durch die Zufuhr von organischem Material verbessert werden.

Die rezenten Böden im Untersuchungsgebiet und in der weiteren Umgebung sind nur schwach entwickelt und besitzen daher nur ein gering mächtiges Solum. Auf den relativ jungen Sedimenten mit oft nur kurzer Verweildauer an der Oberfläche kann es daher in diesem Klimabereich zu keiner ausgeprägten Bodenentwicklung kommen. Man findet daher in den Oasensedimenten keine subfossilen Bodenhorizonte, die stratigraphisch verwertbar wären.

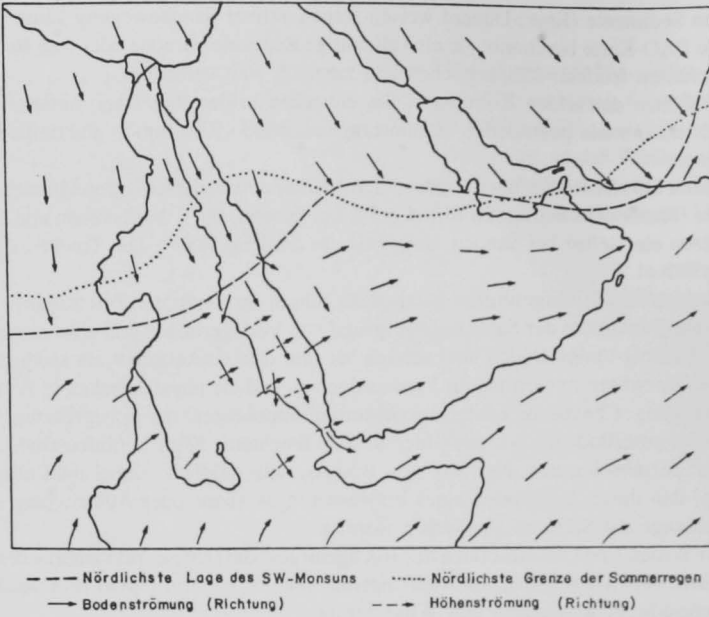
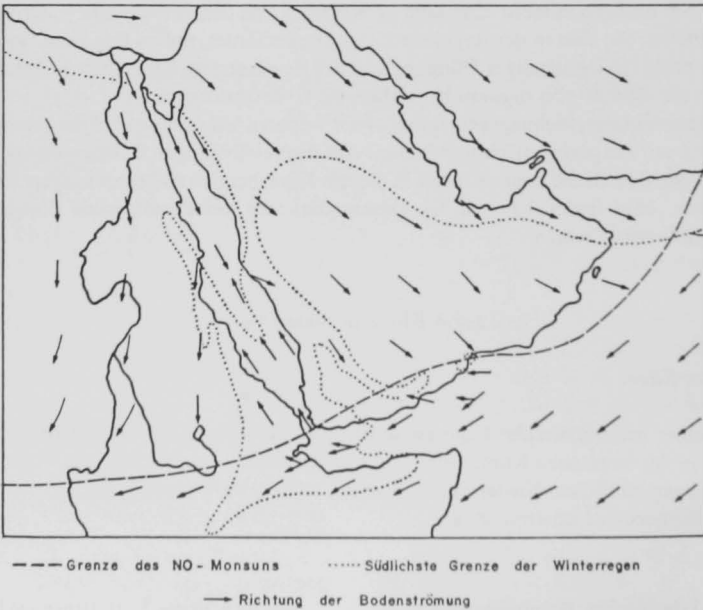
1.4.4 Klima in Südarabien

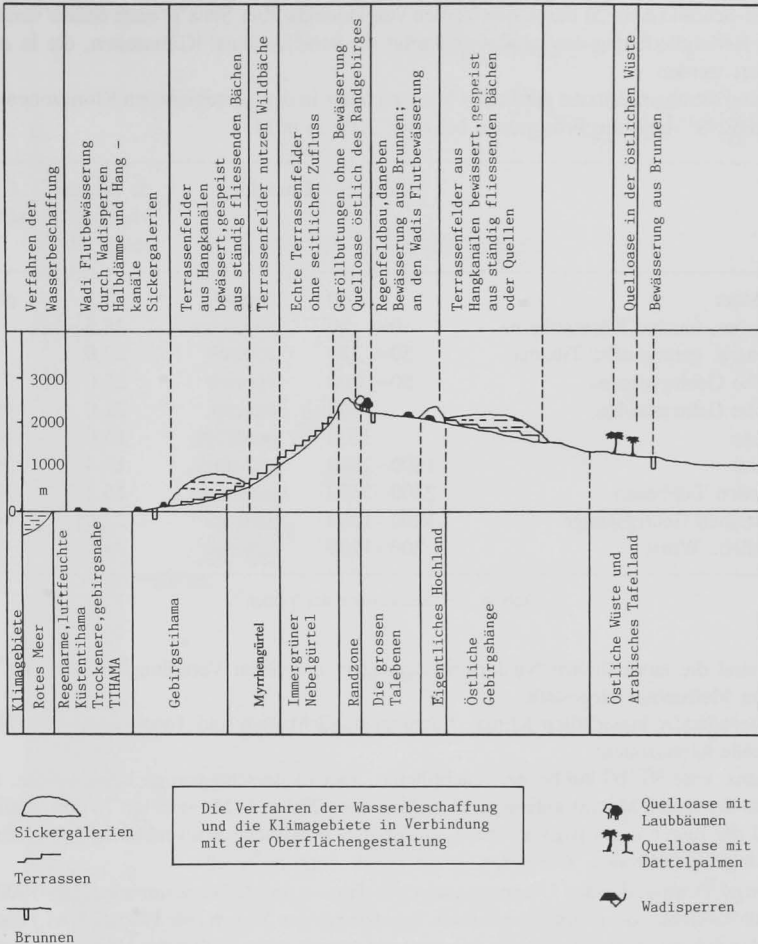
1.4.4.1 Aktuelles Klima

Entsprechend seiner geographischen Lage zwischen dem 12. und 17. nördlichen Breitengrad befindet sich der Yemen in der tropischen Klimazone. Daß trotzdem keine üppige tropische Vegetation existiert, liegt an den geringen jährlichen Niederschlagsmengen, an dem stark vertikal gegliederten Relief und an den Wetter bestimmenden Luftströmungen.

28 F. Scheffer, Lehrbuch der Bodenkunde/Scheffer – Schachtschabel. 9. Aufl. Neubearb. v. P. Schachtschabel, H.-P. Blume, K.-H. Hartge und U. Schwertmann, 1982, 442 S.

bel, H.-P. Blume, K.-H. Hartge und U. Schwertmann, 1982, 442 S.

Abb. 3. Luftströmung über Arabien im Sommer²⁹.Abb. 4. Luftströmung über Arabien im Winter³⁰.


 Abb. 5. Höhendiagramm Hodeida-Şana'a-Märib³².

Der ganzjährigen Nordströmung stehen der sommerliche Südwest-Monsun bzw. der winterliche Nordost-Monsun gegenüber. Die Grenze der jeweils konkurrierenden Luftzirkulationssysteme verschiebt sich je nach Jahreszeit.

Von März bis September liegt die Grenze der konkurrierenden Windsysteme nördlicher (Abb. 3). Dann überwiegen im Yemen die feuchtwarmen Monsunwinde aus südwestlicher Richtung. Sie bringen vor allem im Westen des yemenitischen Gebirges sommerlichen Steigungsregen mit zwei ausgeprägten Niederschlagsmaxima von März bis Mai und von Juli bis September.

Von Oktober bis Februar verschiebt sich die Grenze der Windsysteme nach Süden (Abb. 4). Dadurch gerät der Yemen vorwiegend unter den Einfluß der trockenen und warmen Nordwinde, so daß im Winter normalerweise keine Niederschläge fallen.

Ein West-Ost-Schnitt (Abb. 5) durch den Yemen von Hodeida über Ṣana'ā' nach Mārib verdeutlicht die ausgeprägte Reliefgliederung des Landes und zeigt die verschiedenen Klimazonen, die in Abb. 9 kurz charakterisiert werden.

Außerdem sind die abgeschätzten jährlichen Niederschläge in den verschiedenen Klimazonen aufgeführt. Nach RATHJENS³¹ liegt die Frostgrenze bei etwa 2100 m ü. M.

Klimazone	Höhe, m	Charakter	± Jahres- höchst- temp. °C	C. Nieder- schläge, mm
1. Rotes Meer	0	tropisch	30,5	etwa 1000
2. Regenarme, feuchte Küstentihama	0– 50	tropisch	28,5	80
3. Trockenere, gebirgsnahe Tihama	50– 250	tropisch	27,0	120
4. Westliche Gebirgstihama	50– 400	tropisch	25,0	300
5. Westliche Gebirgshänge	1800	subtrop.	22,0	400– 1000
6. Randzone	3700	gemäßigt	16,0	etwa 1000
7. Hochland	1800– 2500	gemäßigt	16,5	300– 400
8. Die großen Talebenen	2200– 2400	gemäßigt	16,5	300– 400
9. Die östlichen Gebirgshänge	1200– 1500	subtrop.	22,0	100– 250
10. Die östliche Wüste	800– 1200	subtrop.	24,0	80– 100

Abb. 6. Die Klimazonen des Yemen³³.

In Abb. 7 sind die tatsächlichen Niederschlagsmengen und deren Verteilung an den vier im Yemen existierenden Meßstellen dargestellt.

KOPP³⁵ unterscheidet hinsichtlich Klima, Nutzungsmöglichkeiten und Topographie von Westen nach Osten folgende Klimazonen:

1. die Tihama, eine 30–60 km breite, feucht-heiße, aber niederschlagsarme Küstenebene, die sich an der Küste des Roten Meeres entlangzieht und bis etwa 200 m ü. M. ansteigt. In den Wadiläufen, die während der Regenzeiten Wasser führen, finden sich kalkreiche Schwemmlandböden, die landwirtschaftlich genutzt werden. Ansonsten ist die Ebene dünn besiedelt.
2. die Gebirgs-Tihama, die den Übergang zwischen Tihama und Gebirge umfaßt (200–1000 m ü. M.).
3. die westliche Gebirgszone mit den höchsten Erhebungen des Yemen (bis 3760 m ü. M.) und den größten Niederschlagsmengen. In den fruchtbaren und regenreichen Teilen des Hochlandes wird intensiv Ackerbau (Terrassenkulturen) betrieben. Diese Räume weisen auch die höchste Bevölkerungsdichte auf (über 200 Einwohner/km² bei Ibb und Ta'izz), wodurch die große Übereinstimmung zwischen den Niederschlagsmengen und der Bevölkerungsdichte bewiesen wird.
4. das zentrale Hochland mit den großen Hochebenen und Becken von Ṣana'ā', 'Amrān, Ma'bar, Dhamār und Yarīm bietet die Möglichkeit einer intensiven Grundwassernutzung, so daß Landwirtschaft durchgeführt wird. Ṣana'ā' als Hauptstadt besitzt mehr als 500 Einwohner/km².

29 C. Rathjens et al., Beiträge zur Klimakunde Südwest-Arabiens: Das Klima von Sana. Das Klima von Jemen, Deutscher Wetterdienst Seewetteramt, 1956, 37 S., S. 14.

30 Rathjens a.O. (s. o. Anm. 29)

31 Rathjens a.O. (s. o. Anm. 29), S. 26.

32 Dequin a.O., S. 32.

33 Dequin a.O., S. 18

34 Brunner a.O. (s. o. Anm. 1), S. 11.

35 H. Kopp, Agrargeographie der Arabischen Republik Jemen, Erlanger Geographische Arbeiten, Sonderband 11, 1981, 294 S.

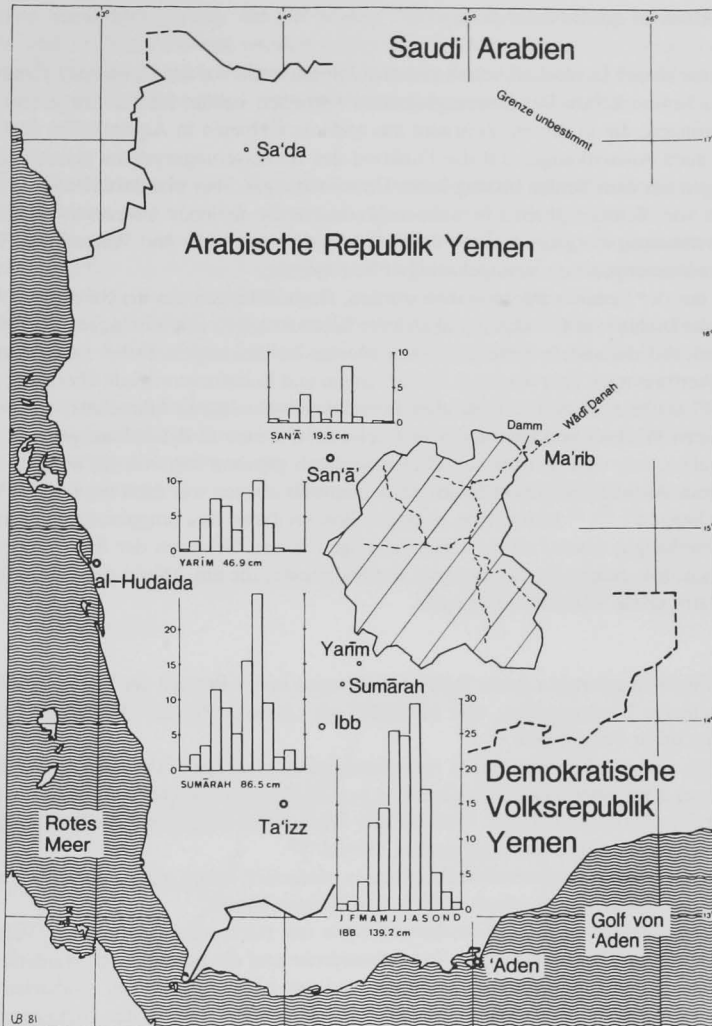


Abb. 7. Niederschlagsverteilung und Lage des Einzugsgebietes des Wādī Dana³⁴.

5. das östliche Gebirgsland, ein Schicht-Stufen-Land, dessen Höhe nach Osten hin bis auf 1000 m ü. M. abnimmt. Hier herrscht Weidewirtschaft vor.
6. die Wüstensteppe mit den großen Wadis.
7. die Oasenzone als Übergang zur Rub'al-Khālī; die beiden letztgenannten Standorte sind von der regelmäßigen Wasserführung und den Schwemmlandböden am Rande der Wadis abhängig, was sich auch in den Bevölkerungszahlen niederschlägt (die Provinz Mārib besitzt weniger als 5 Einwohner/km²).
8. die Rub'al-Khālī, die große Sandwüste Innerarabiens.

1.4.4.2 Paläoklima in äquatorialer Nähe

Da die Bewohner dieser Landschaft schon mehrere Jahrtausende vor der Zeitwende Landwirtschaft mit Hilfe eines hochentwickelten Bewässerungssystems betrieben haben, ist die Frage von Interesse, ob Klimaveränderungen, die in diesem Zeitraum aus anderen Gebieten in Äquatornähe (z. B. der Sahara) bekannt sind, auch Auswirkungen auf die Funktion des Bewässerungssystems gehabt haben können. Allerdings liegen aus dem Yemen bislang keine Untersuchungen über pleistozäne oder holozäne Klimaschwankungen vor. Schwierigkeiten bereitet insbesondere die fehlende Untersuchung von Sedimentations- und Verwitterungsvorgängen sowie deren Korrelation mit Kalt- und Warmzeiten. Ebenso fehlen absolute Altersdatierungen von aussagekräftigen Sedimenten.

Deshalb kann nur der Versuch unternommen werden, Beobachtungen aus der Sahara und Ostafrika, wo eine relativ hohe Dichte von C^{14} -Daten und anderer Klimaaussagen den Klimagang des Quartärs rekonstruieren helfen, auf die andere Seite des Roten Meeres zu übertragen. Dabei ist es aber fraglich, ob solche Datenübertragungen über derartige Entfernungen und Reliefunterschiede überhaupt zulässig sind. MECKELEIN³⁶ stellte noch fest: „Trotz aller Forschungen der letzten Jahrzehnte, steht eigentlich nur fest, daß es einen Wechsel von feuchteren zu trockeneren Zeiten in der Sahara gegeben hat. Bis jetzt ist offen geblieben, wie viele Klimawechsel es tatsächlich gegeben hat, wie sie wirklich einzugliedern sind und welches Ausmaß sie gehabt haben nach Intensität ebenso wie nach räumlicher Verbreitung.“ Jüngere Forschungen^{37, 38, 39} lassen eine exaktere Beschreibung des jungpleistozänen und holozänen Klimas zu. Unabhängig davon, ob die Untersuchungen in den Gebirgen der Sahara oder in Ostafrika durchgeführt wurden, zeigen die Datierungen der Sedimente, die ein Abbild der Klima-Schwankungen darstellen, relativ große Übereinstimmungen.

Pleistozän

Während der Eiszeiten gelangten große Teile der Subtropen in den Bereich der Westwind-Drift und damit in die Zone höherer Niederschläge, was FLOHN⁴⁰ als „polares Pluvial“ bezeichnet. In den Tropen herrschten dann aride Verhältnisse.

Zudem zeichnen sich die Eiszeiten durch ein offensichtlich planetares Absinken aller Klimastufen um 1000 m aus, was etwa einer Temperaturabnahme von 6–8° C entspricht⁴¹. So sind aus den Gebirgen Ostafrikas Vergletscherungen bekannt. Während der Warmzeiten hingegen traten im (heutigen) Wüstengürtel tropische Sommerregen auf („tropisches Pluvial“)⁴².

Da sich Eiszeiten und Warmzeiten weltweit mehrmals wiederholt haben, muß sich der Klimawechsel von der Pluvialzeit zur Zwischenpluvialzeit mehrfach vollzogen haben.

Im Jungpleistozän herrschten aride Klimabedingungen mit stärkerer physikalischer Verwitterung vor allem in den Gebirgen. Das Fehlen einer Vegetationsdecke und die periodischen Niederschläge führten zu einem starken Sedimenttransport in den Wadis und zur Akkumulation des erodierten Materials im Unterlauf. In den Gebirgen der Sahara setzten etwa um 15 000 BP⁴³ und in den Gebirgen Ostafrikas um

36 W. Meckelein, Aride Verwitterung in Polargebieten im Vergleich zum subtropischen Wüstengürtel, in Z. Geomorph. N. F., Suppl. Bd. 20, S. 178–188, 1974.

37 E. S. Nicholson – H. Flohn, African Environmental and Climatic Changes and the General Atmospheric Circulation in the Late Pleistocene and Holocene, Climatic Change, 2, 1980, S. 313–348.

38 C. J. Stager, The Distom Record of Lake Victoria (East Africa) in the last 17 000 years, in 7th Distom. Symp. Zool. Dep. Durham USA, 1982, S. 455–476.

39 S. Hastenrath, The glaciers of Equatorial East Africa, 1984, 353 S.

40 H. Flohn, General Climatology, 2, Elsevier 1969, XII, 266 S.

41 B. Messerli, Die afrikanischen Hochgebirge und die Klimageschichte Afrikas in den letzten 20 000 Jahren, in Das Klima, 1980, S. 64–89.

42 Flohn a.O. (s. o. Anm. 40).

43 J. Maley, Histoire de la végétation et du climat de l'Afrique nord – tropicale. Im 10 au Quatenaire récent, in Bothalia 14, 3 et 4, Pretoria, 1983, S. 377–389).

12 000 BP⁴⁴ erste Seenbildungen ein, die auf bessere Niederschlagsverteilung bei humiderem Klima zurückzuführen sind. In dieser Periode wurden wegen der stärkeren chemischen Verwitterung überwiegend feinkörnige Sedimente von den Flüssen in den Seen abgelagert, die um 12 000 BP in den Gebirgen der Sahara und um 10 000 BP im Sahel ihre größte Ausdehnung erreichten⁴⁵.

Holozän

Alle Autoren beschreiben im mittleren Holozän einen grundlegenden Klimawechsel etwa um 7000 BP zu trockenerem und saisonalem Klima, sowie ein Verlanden der Seen. Nach MALEY⁴⁶ waren die Niederschläge viel unregelmäßiger und lokal von unterschiedlicher Intensität. Sie konzentrierten sich vor allem im Sommerhalbjahr. Die Ablagerungen der großen Flüsse wurden grobkörniger und unregelmäßiger. Dieser Zusammenhang weist auf Starkregen und Hochwasserabflüsse hin.

Zwischen 5000 BP⁴⁷ und 4000 BP⁴⁸ schwächten sich die Niederschläge weiter ab, so daß in den Tropen und Subtropen Afrikas eine deutliche klimatische Ariditätszunahme vom jüngsten Holozän bis heute erkennbar ist.

Obwohl diese Datenzusammenstellung in vielen Punkten noch umstritten ist, können durch die Übereinstimmung der in verschiedenen Gebieten gewonnenen Ergebnisse Hinweise auf eine klimatische Veränderung von den feuchteren zu den ariden Tropen gegeben werden.

Die folgende Abbildung ist ein Versuch, die Klimadaten in den letzten 20 000 Jahren stark vereinfacht darzustellen.

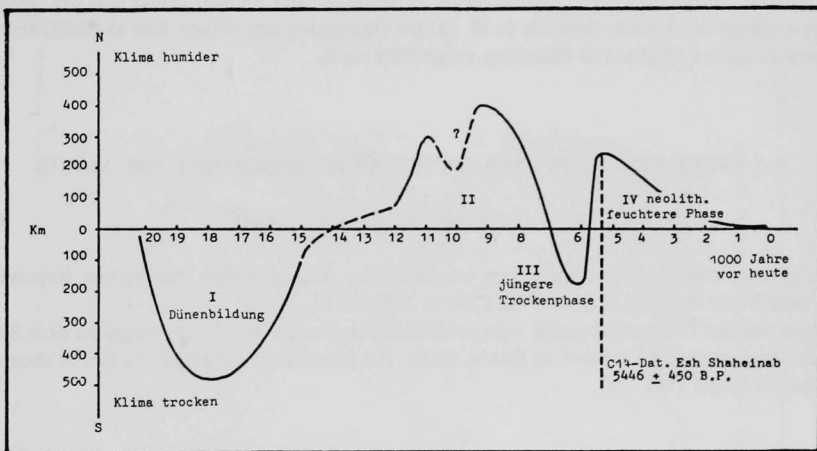


Abb. 8. Klimawechsel im Sudan von 20 000 BP bis heute⁴⁹.

44 Hastenrath a.O. (s. o. An. 39), S. 43.

45 Nicholson – Flohn a.O. (s. o. Anm. 37).

46 Maley a.O. (s. o. Anm. 43).

47 A. T. Grove, Late quaternary climatic change and the conditions for current erosion in Africa, in Geo-Eco-Trop., 2, 1978, S. 291–300.

48 Nicholson – Flohn a.O. (s. o. Anm. 37).

49 Nach G. E. Wickens, Changes in the climate and vegetation of the Sudan since 20 000 B. P., in Boissiera, 24, S. 43–65, 1975.

1.4.4.3 Tektonische Einflüsse auf das Klima

Veränderungen des Kleinklimas, das von Höhenlage, Exposition und Inklinatıon bestimmt wird, stehen häufig in Abhängigkeit von geologischen Entwicklungen. Daher ist anzunehmen, daß die starken Hebungen, die seit dem Tertiär die Arabische Platte erfaßten, zumindest das Kleinklima verändert haben. Zudem können durch tektonische Bewegungen sogar größere Klimaveränderungen vorgetäuscht werden. Die Randgebirge des Rote-Meer-Grabens sind seit dem Tertiär um mehrere hundert Meter gehoben worden⁴⁹.

Aus den Gebirgen Äthiopiens sind z. B. Hebungen von einigen Millimetern pro Jahr bekannt⁵⁰. Damit sind eine intensivere Verwitterung und eine verstärkte Abtragung verbunden, die allerdings aufgrund des geringen Zeitraumes das Relief noch nicht entscheidend geprägt haben.

Viele Aussagen über das jüngere Paläoklima stützen sich auf die Sedimentakkumulation und die Sementerosion durch Flüsse. Akkumulation gilt als Zeichen für Aridität und Erosion wird im allgemeinen einem feuchteren Klima zugeordnet.

Können bei gleichbleibendem Klima oder nur graduellen Klimaschwankungen durch verstärkte Hebung und gleichzeitig steigender Abtragung Akkumulationen im Wadiunterlauf entstehen, die eine größere Aridität suggerieren, so ist der Schluß, Sedimentations- gleich Klimaveränderung in Frage zu stellen. Tatsächlich könnte durch die Reliefverteilung und die damit verbundene höhere Fließgeschwindigkeit des Wadis Erosion im Unterlauf einsetzen und feuchtere Klimaabschnitte vorgetäuscht werden. So beschreibt PFLAUMBAUM⁵¹ im Sudan die verstärkte Eintiefung von Nil und Wadis in den unteren Laufabschnitten aufgrund des fortgesetzten Hebungsimpulses im Gebirge. Der gleiche Effekt tritt ein, wenn durch Senkungsvorgänge im Vorfluterbereich (z. B. in der Depression der Wüste Rub'al-Khālī) der Höhenunterschied zwischen Quelle und Mündung vergrößert wird.

1.5 EINFÜHRUNG IN DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET UM MĀRIB

1.5.1 Geographische Lage von Mārib

Die heutige Provinzhauptstadt Mārib liegt im Osten der Yemenitischen Arabischen Republik, etwa 120 km östlich der Hauptstadt Ṣana'ā in 1200 m Höhe ü. M.

Sie befindet sich im Übergangsbereich vom yemenitischen Grund- und Deckgebirge zu dem Senkungsbereich der innerarabischen Sandwüste Rub'al-Khālī. Alt-Marib liegt auf einem die Ebene überragenden kegelförmigen Hügel (Taf. 2d).

1.5.2 Geologie des Einzugsgebietes des Wādī Dana

Die westliche Begrenzung des Einzugsgebietes des Wādī Dana wird von den neogenen basaltischen Lava-Serien des yemenitischen Hochlandes gebildet, die gleichzeitig als Wasserscheide zwischen dem Roten Meer und der innerarabischen Wüste Rub'al-Khālī auftreten. Aufgrund der plus-minus horizontal lagernden Basaltlaven ist die unterirdische Wasserscheide mit der oberirdischen identisch, die das Einzugsgebiet begrenzt.

50 Messerli a.O. (s. o. Anm. 41)

51 H. Pflaumbaum, Waditerrassen- und Fußflächengenese in der Bayuda-Wüste (Republik Sudan). Ein Beitrag

zur Morphogenetischen Sequenz eines randtropisch-ariden Raumes. 1987, 134 S., S. 115.

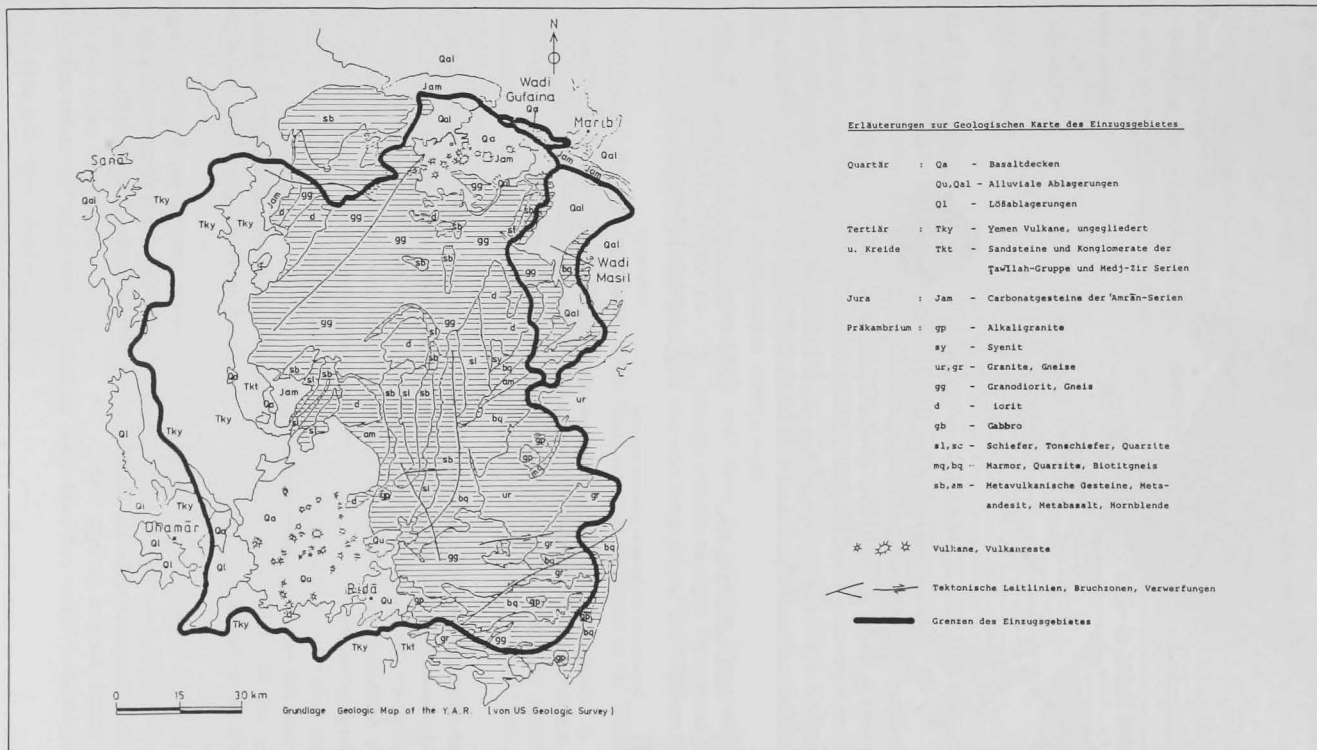


Abb. 9. Geologische Karte des Einzugsgebietes des Wādī Dana.

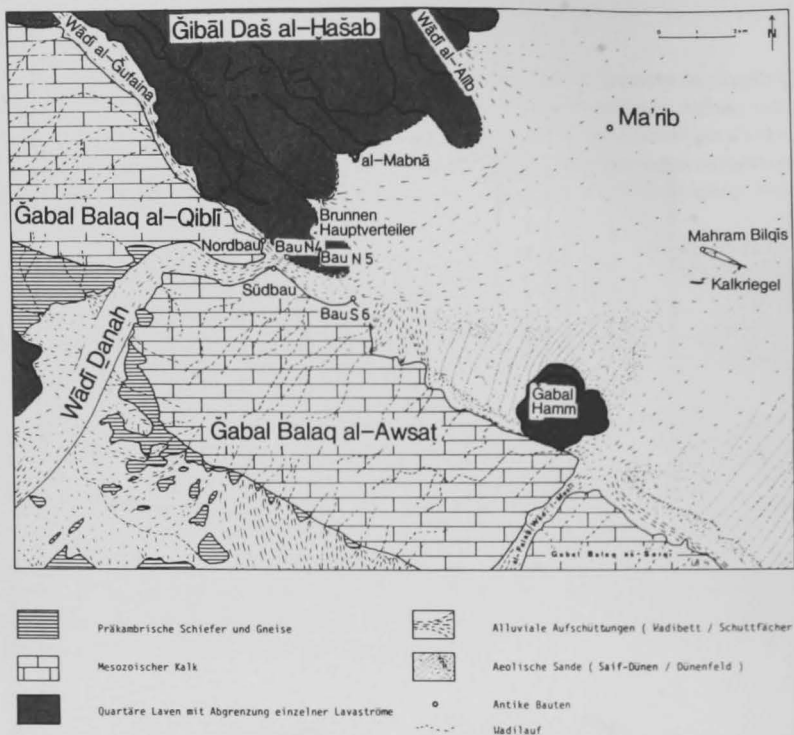


Abb. 10. Geologische Kartenskizze des Untersuchungsgebietes mit der Lage wichtiger Bauten und Lokalitäten vor Aufnahme der Bewässerung⁵².

Dies zeigt, daß die Ausbildung des aktuellen Gewässernetzes von den tertiären und quartären tektonischen Vorgängen und der damit verbundenen Reliefentwicklung gesteuert wurde.

Nach Osten folgt auf die schmalen Streifen der Tawila-Sandsteine und Kalke der 'Amrān-Serien das präkambrische Kristallin, das mehr als die Hälfte der Fläche des Einzugsgebietes einnimmt und bis an das alte Senkungsgebiet der innerarabischen Wüste reicht, in das der Flußlauf mündet.

Ein jurassischer Horst aus 'Amrān-Kalken begrenzt das Gebirge bei Mārib gegen das Becken der innerarabischen Wüste mit seiner jüngeren Sedimentfüllung.

Die Kalke, die mit 30° nach NO einfallen und etwa 600 m aufragen, bezeugen die ehemalige mesozoische Bedeckung des Kristallins. Diese Schichten, zu denen der Ġabal Balaq zählt, bilden die markante steile Bruchstufe zur Wüste Rub'al-Khālī (Taf. 2c).

Da sich Talsysteme in tektonisch stark beanspruchten Gebieten tektonischen Leitlinien anpassen, ist es möglich, daß eine tektonische Störung den Durchbruch des Wādī Dana durch den Ġabal Balaq in die weite Ebene der Wüste verursacht. Bis zu diesem Durchbruch ist das Talsystem im Sockelbereich weit gespannt und besitzt nur eine geringe Tiefe.

Die quartäre basaltische Vulkan- und Lava-Zone, die sich von Širwāḥ im Westen bis unmittelbar nördlich

⁵² Nach Brunner a.O. (s.o. Anm. 1), S. 9.

von Mārib erstreckt, liegt im Einzugsgebiet des Wadis. Das Erdbeben von 1982, bei dem Mārib weitgehend zerstört wurde, beweist, daß die tiefgreifende tektonische Störungszone, die das Becken begrenzt, bis in die heutige Zeit aktiv ist.

Ein Lavastrom aus diesem Vulkanfeld ist die Ursache für die Ablenkung des Wādī Dana nach Südosten beim Austritt aus den mesozoischen Kalken (vgl. Abb. 10). Während das in dem Schuttfächer fließende Grundwasser weiterhin der alten Morphologie folgend unter dem Lavastrom hindurchfließt, war das Oberflächenwasser gezwungen, sich ein neues Flußbett zu suchen.

1.5.3 Das Klima von Mārib

1.5.3.1 *Aktuelles Klima*

Die antike Oase Mārib befindet sich am Fuß der östlichen Gebirgshänge, im ariden Klimabereich (vgl. Abb. 6). Die Niederschläge sind sehr selten und treten meist als Gewitter auf.

Die Luftfeuchtigkeit ist gering, dennoch konnten auf der antiken Oase häufiger nach Sonnenaufgang Taubildungen beobachtet werden, was die Vegetation erheblich begünstigt. In dieser Klimazone existiert ohne Bewässerung nur spärliche Vegetation, die von der Dornbuschsavanne der unteren Gebirgshänge und der Akaziensavanne der Wadis nach Osten bald in die vegetationsfreie Wüste übergeht.

GLASER⁵³ ermittelte in einem 40 m tiefen Brunnen eine Wassertemperatur von 26° C, so daß eine ähnliche mittlere Jahrestemperatur angenommen werden kann.

Der kälteste Monat ist der Dezember. Gelegentlich sinkt dann das absolute Temperaturminimum in Mārib in den Morgenstunden auf Werte um 5° C. Mittags wurden dagegen Temperaturen von 31° C festgestellt. Die täglichen Temperaturschwankungen sind also beträchtlich. Der wärmste Monat ist der Juli.

Die Anlage der Oase war nur am Austritt des Wādī Dana aus dem Hochland in die Ebene der Wüste Rub'al-Khālī – dem „leeren Viertel“ – möglich.

Obwohl im Einzugsgebiet des Wādī Dana nur noch durchschnittliche Niederschlagsmengen von 100 bis 400 mm jährlich vorhanden sind, führt das Wadi während der beiden Regenzeiten im Sommer beträchtliche Oberflächenabflüsse und einen ganzjährigen Grundwasserstrom, so daß in der Talebene nach den Regenzeiten regelmäßiger Ackerbau stattfinden kann.

Mit dem Abzweigen eines Teils des Abflusses zur Bewässerung von Flächen außerhalb des Wadibettes wurde trotz des ariden Klimas der Grundstein der antiken Oase Mārib in der Ebene der Wüste gelegt.

1.5.3.2 *Paläoklima im Einzugsgebiet des Wādī Dana*

Die Geländeformen und die weit in die Wüste hineinreichenden fluviatilen Sedimente des Wādī Dana, die durch vermehrt fließendes Wasser geschaffen worden sein müssen, beweisen ein früher wesentlich feuchteres Klima. Davon zeugen heute auch trockene Täler, bunte Kalktuff-Decken in der Umgebung versickerter Quellen sowie Salzpflanzen in der Wüste.

Das Auftreten fossiler Kalkkrusten nördlich des Wadis im Untergrund der antiken Oase deutet ebenfalls auf ehemals andere klimatische Bedingungen hin. Die Kalkkrusten sind teilweise einige Zentimeter dick und verkitten fluviatil umgelagerten Sand, Geröll oder Lavagrus. Unter den heutigen ariden Gegebenheiten entwickeln sich keine Kalkkrusten.

53 Eduard Glasers Reise nach Marib. Sammlung Eduard Glaser I. 1913.

BLÜMEL⁵⁴ und GELLERT⁵⁵ kommen – obwohl von verschiedenen Ansätzen ausgehend – zu dem Ergebnis, daß Kalkkrustenbildung lediglich im semiariden Klima mit gelegentlichen Niederschlägen zwischen 450 und 800 mm möglich ist.

An dieser Stelle muß die Frage aufgeworfen werden, ob nicht gelegentliche Überflutungen mit ähnlichen Versickerungsintensitäten gleiche Effekte erzeugen, so daß aus der Existenz der Krusten für das Gebiet um Märib nicht unbedingt feuchtere Klimabedingungen als die rezenten ariden gefolgert werden können. Das in die Sedimente eingedrungene Wasser besaß einen gelösten Kalkanteil oder löste den Kalk, z. B. aus der Feldspatverwitterung und schied ihn nach dem kapillaren Aufstieg durch Verdunstung als Kruste an der Oberfläche wieder aus, wobei die Verdunstung durch Winde noch wesentlich gesteigert wurde. Die Inkrustierung fällt in die Zeit des quartären Vulkanismus, dessen Aschen in die Bildungen einbezogen wurden. Zu dieser Zeit müssen im Einzugsgebiet unregelmäßige Niederschlagsereignisse von ungewöhnlicher Intensität stattgefunden haben (vielleicht ausgelöst durch Eruptionsgewitter). Dadurch wurde der Sedimentanteil im Wasser des Wadis erheblich erhöht und das Belastungsverhältnis so verändert, daß die größeren Partikel bald wieder abgelagert wurden.

Ein jüngerer nicht datierter Lavastrom aus dem Vulkangebiet des Ġibāl Daš al-Ḥaṣab überfloß die Kalkkrusten und zwang das Wādī Dana zur Änderung seines Laufes nach Süden und beendete somit die Wirkung des fließenden Wassers auf die Sedimente dieses Gebietes (vgl. Abb. 10).

Auch die Akkumulation von feinkörnigen Sedimenten im ursprünglichen Wadibett wird von demselben Lavastrom überdeckt. Diese Sedimente, die erst das ehemals tiefe Wadibett vollständig auffüllten und dann eine Sandschwemmebene bildeten, gleichen stark den antiken Oasensedimenten und sind daher einem ähnlichen Klima zuzuordnen. Nach HÖVERMANN⁵⁶ bilden sich die charakteristischen Sandschwemmebenen bei durchschnittlichen Jahresniederschlägen zwischen 20 und 60 mm in Form von Starkregen.

Die Datierung der Krustenbildung und die Wadibettakkumulation könnte zeitlich eingegrenzt werden, wenn eine Datierung des nach Süden gerichteten Lavastromes vorgenommen würde.

Während die Krustenbildung schon abgeschlossen war, ging die Akkumulation der feinkörnigen Sedimente auch in dem neuen Wadibett weiter und reichte wahrscheinlich bis in die Anfänge der sabäischen Bewässerungskultur, die auf der Schwemmebene begann. Daher sind die Wadisedimente seismisch nicht von den auflagernden Oasensedimenten zu unterscheiden. In den Sedimenten der Oase ist eine bedeutende Klimaänderung während der Betriebszeit nicht erkennbar.

Abschließend ist hervorzuheben, daß die Entwicklung des Reliefs des Yemen, insbesondere der Region Märib, seit dem Tertiär entscheidend auf die Hebung des yemenitischen Gebirges parallel zum Rote-Meer-Graben (geodynamischer Impuls) zurückzuführen ist. Neben dem prägenden Prozeß waren auch klimatische und morphodynamische (Akkumulation, Erosion) Impulse an der Reliefentstehung beteiligt. Da alle Prozesse auch rezent noch aktiv sind und sich die Sedimentationsbedingungen unmittelbar vor und während der Oasenbetriebszeit nicht wesentlich verändert haben, ist von überwiegend gleichgebliebenen, vermutlich ariden Bedingungen auszugehen, was humidere Perioden nicht ausschließt. Erst gegen Ende der Betriebszeit zeigen gröbere Kornfraktionen in den Oasensedimenten eine gesteigerte Aridität oder eine verstärkte tektonische Aktivität in diesem unruhigen Gebiet an.

54 W.-D. Blümel, Kalkkrustenvorkommen in Südwestafrika. Untersuchungsmethoden und ihre Aussagen, Mittl. Baseler Afrika Bibl., Vol. 15, 1976.

55 J. F. Gellert, Pluviale und Interpluviale in Afrika. Geologisch-paläoklimatologische und paläogeographische Fakten und Probleme, in Pet. Mitt., 118, 1974, S. 104–116.

56 J. Hövermann, Typen von Vorlandvergletscherungen in Nordost Tibet, in Regensburger Geogr. Schriften. 19/20: Geographie. I. Schaefer – Festschrift S. 29–52, 1985.

1.5.4 Rezente Verwitterung im Einzugsgebiet des Wādī Dana

Unter den heutigen Klimabedingungen herrschen im Einzugsgebiet des Wādī Dana neben den überwiegenden physikalischen auch chemische Witterungsprozesse, wobei die Bedeutung der letztgenannten von Westen nach Osten abnimmt.

In den höheren westlichen Bereichen des Einzugsgebietes mit durchschnittlichen Niederschlagsmengen zwischen 300 bis 400 mm spielt die chemische Verwitterung eine erhebliche Rolle. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang ebenfalls der Taufall, der nach eigenen Beobachtungen auch in den niederschlagsarmen Perioden fast täglich in den frühen Morgenstunden stattfindet.

Die physikalische Verwitterung wird von der unmittelbaren ganzjährigen Temperaturverwitterung, die auf einen ausgeprägten Temperaturtagesgang zurückzuführen ist, der Salzsprengung und der winterlichen täglichen Frostsprengung in den Höhen oberhalb der Frostgrenze (ca. 2100 m) geprägt.

Da aus dem Gebirge des Yemen keine ganzjährigen Klimabeobachtungen vorliegen, lassen sich keine Angaben über die Frostwechselhäufigkeit machen.

Die bei den physikalischen Verwitterungsprozessen anfallenden Korngrößen liegen überwiegend im Sand- und Schluffbereich⁵⁷. Da ein großer Teil des Einzugsgebietes aus basischen Gesteinen besteht, entstanden und entstehen Verwitterungsprodukte mit reicher Mineralreserve, die von den seltenen starken Regenfällen im Jahr abtransportiert werden. Im Mündungsgebiet des Wadis in der Umgebung von Märīb gewinnen, bedingt durch den Feuchtigkeitsmangel (unter 100 mm Jahresniederschlag) bei gleichzeitigen starken täglichen Temperaturschwankungen, die physikalischen Verwitterungsbedingungen eine noch größere Bedeutung. Die weitgehend vegetationsfreien oder höchstens schütter bewachsenen Gesteine sind im wesentlichen der Insolationsverwitterung ausgesetzt, die vor allem von der Salzsprengung begleitet wird.

Neben diesen für wüsten- und halbwüstentypischen Verwitterungsvorgängen kommt es durch den gelegentlich auch hier zu beobachtenden Taufall am frühen Morgen sicherlich zu chemischen Verwitterungsprozessen.

1.5.5 Sedimentakkumulation vor Aufnahme der anthropogenen Bewässerung

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Sedimentationsvorgänge im Zusammenhang mit dem Abflußverhalten im Einzugsgebiet des Wādī Dana gegeben. Zusätzlich wird auf die besonders wichtige Sedimentakkumulation vor der Bewässerungsaufnahme durch die Sabäer eingegangen. (Sedimentation ist abhängig von den im Sedimentationsraum herrschenden physikalischen und chemischen Bedingungen.)

Die fluviatile Tätigkeit des Wassers beruht auf dem Transport von Lösungen und Sedimenten. Lediglich bei einer größeren Fließgeschwindigkeit als 0,1 m/s kann grobes Material mit Korngrößen $> 0,063$ mm Durchmesser verfrachtet werden. Da die Fließgeschwindigkeit von dem Gefälle des Wadis, dem Geschwindigkeitswert K_s , dem Abfluß und dem durchflossenen Querschnitt des Flußbettes bestimmt wird, unterliegt sie örtlichen und jahreszeitlichen Schwankungen.

In den semiariden Gebieten mit nur periodischer Wasserführung der Flüsse erreicht die Schwebstofffracht ihre vergleichsweise höchsten Beträge. Demzufolge bildet die Geröll- oder Geschiebefracht, zu der auch Sand und Kies gehören und die ursächlich als Scheuermaterial für die Tiefenerosion verantwortlich ist, mengenmäßig den kleinsten Anteil der Gesamtfracht. Fast die gesamte kinetische Energie des

57 A. Semmel, Quartärgeologische Untersuchungen in der Donahilwüste (Äthiopien) und ihren westlichen

Randgebieten, in Nachrichten Deutsche Geologische Gesellschaft 7, 1973, S. 43–46.

fließenden Wassers wird dabei durch den Schutttransport verbraucht, so daß die eigenen Akkumulationsmassen das Flußbett vor Erosion bewahren. Daher sind die Betten der Flüsse dieser Gebiete auch bei größerem Gefälle kaum in die Landoberfläche eingeschnitten. Sind dennoch, wie in Märib, die ehemaligen Flußläufe tief in den Untergrund eingeschnitten, wobei tektonische Störungen ausgeräumt und genutzt wurden, muß auf stärkere Erosion in früherer Zeit unter anderen Klimabedingungen mit periodisch größerer bzw. kontinuierlicher Wasserführung geschlossen werden.

Für diese Tatsache sprechen auch die weit in die arabische Wüste hineinreichenden Schwemmfächer, die eine viel größere Wasser- und Sedimentführung in früheren Pluvialzeiten, etwa zeitgleich zu den Eiszeiten des Quartärs, belegen.

Mit dem Materialtransport sind die beiden auffallenden morphologischen Tätigkeiten des Flusses, Abtragung und Ablagerung, eng verknüpft.

Dabei werden die Korngrößen der mitgeführten Bruchstücke in Abhängigkeit von der petrographischen Beschaffenheit durch Reibung der Gerölle aneinander verkleinert und die Korngrößenverteilung verändert. Die im folgenden kurz skizzierten Eigenschaften des untersuchten Einzugsgebietes begründen die große Bedeutung des Stofftransports im Wādī Dana:

1. Die sehr spärlich vorhandene Vegetation, das vergleichsweise steile Gelände, die vorherrschende physikalische Verwitterung und das Auftreten relativ hoher Niederschlagsintensitäten begünstigen die Erosion und somit die flächenhafte Zufuhr von Feststoffen in das Wadibett. Jedoch trifft das nur in Gebieten zu, die nicht terrassiert wurden, da diese Art der Bewirtschaftung den Oberflächenabfluß und damit die Erosion auf ein Minimum reduziert.
2. Das große Gefälle der Wadis führt zu hohen Fließgeschwindigkeiten.
3. Die relativ hohen Abflußspitzen ermöglichen wegen des nicht linearen progressiven Zusammenhangs zwischen Abfluß und Sedimentfracht einen beträchtlichen Anteil mittransportierter Stoffe.

Während die Lösungsfracht bis in das abflußlose Becken der Wüste gelangt, kann die restliche Fracht nur soweit befördert werden, wie ausreichendes Gefälle für den Transport zur Verfügung steht, was neben dem Abfluß auch von den Korngrößenverhältnissen abhängig ist. Schließlich handelt es sich meist um Unterläufe mit wenig Gefälle und entsprechend feinkörnigem Material. Die Suspension besteht überwiegend aus Schluff und Ton. Nimmt die Fließgeschwindigkeit infolge Querschnittsvergrößerung des Flusses, Relief- und Reibungsänderungen ab oder der Frachtanteil zu, so ist der Strom nicht mehr in der Lage, seine gesamte Fracht weiter zu transportieren, und er beginnt einen Teil abzulagern.

Aufgrund des dadurch verringerten Gefälles beschleunigt sich die Ablagerung von zunächst gröberen, wenig später auch feineren Komponenten. Dies geschieht oft beim Übergang vom Gebirge in flaches Gelände. Dort werden dann breite, sich ständig erhöhende Schwemmfächer aufgebaut, wie es nach dem Austritt des Wādī Dana aus dem Ġabal Balaq in die Ebene der arabischen Wüste der Fall ist. Diese weite Akkumulationsebene bildete die Basis, auf der die Sabäer ihr Bewässerungssystem anlegen konnten. Ein Beispiel für die Größenordnung der möglichen Erhöhung bieten die nepalischen Terrai Flüsse, die Berichten zufolge⁵⁸ durch Ablagerungen in der Ebene um etwa 15–30 cm jährlich aufsedimentieren.

1.5.6 Ermittlung der Mächtigkeit der Oasenablagerungen

Neben der bekannten geodätischen Höhe der letzten, teilweise noch gut erhaltenen, Bewässerungsanlagen und -flächen ist für die Ermittlung der Oasenmächtigkeit auch die Kenntnis über die Höhenlage der Oasenbasis notwendig. Die Mächtigkeit der Ablagerungen kann bei bekannter Sedimentationsrate/Jahr unmittelbar in die Betriebszeit der Oase umgerechnet werden.

58 F. Kollmannsperger, Erosion – eine globale Gefahr.
1979, S. 62.

1.5.6.1 Untersuchungsverfahren

Die Mächtigkeit der Oasensedimente und die Morphologie des Untergrundes vor Beginn der Sedimentation kann man durch verschiedene Untersuchungen ermitteln. Die genauesten Ergebnisse sind mit Hilfe von Bohrungen zu erzielen, was aber sehr zeitaufwendig und teuer ist. Daher wurde auf ein geophysikalisches Verfahren, die Refraktionsseismik, zurückgegriffen, welches zugleich preiswert ist.

Die seismischen Verfahren beruhen darauf, daß sich elastische Wellen in den verschiedenen Erdschichten, entsprechend der unterschiedlichen Dichte, mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen. So werden ausgesandte Wellen an Grenzflächen im Untergrund gebrochen und reflektiert. Die Struktur des Untergrundes bildet sich in dem zeitlichen Ablauf der Wellenausbreitung ab, und es besteht die Möglichkeit, aus den Laufzeiten der verschiedenen Wellenzüge, deren Weg und somit den Aufbau des Untergrundes zu erforschen.

Bei dem Refraktionsverfahren wird außer der Ausbreitungsgeschwindigkeit der an der Erdoberfläche laufenden direkten Welle auch die an einer Schichtgrenze gebrochene Welle ermittelt.

Theoretisch spielt sich dabei folgender Vorgang ab: Die gebrochene Welle erreicht die liegende Grenzfläche unter dem Winkel der Totalreflexion, läuft dann entlang der Grenzfläche mit der höheren Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der, in der Regel dichteren, liegenden Schicht und wird fortwährend unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion an die Oberfläche reflektiert.

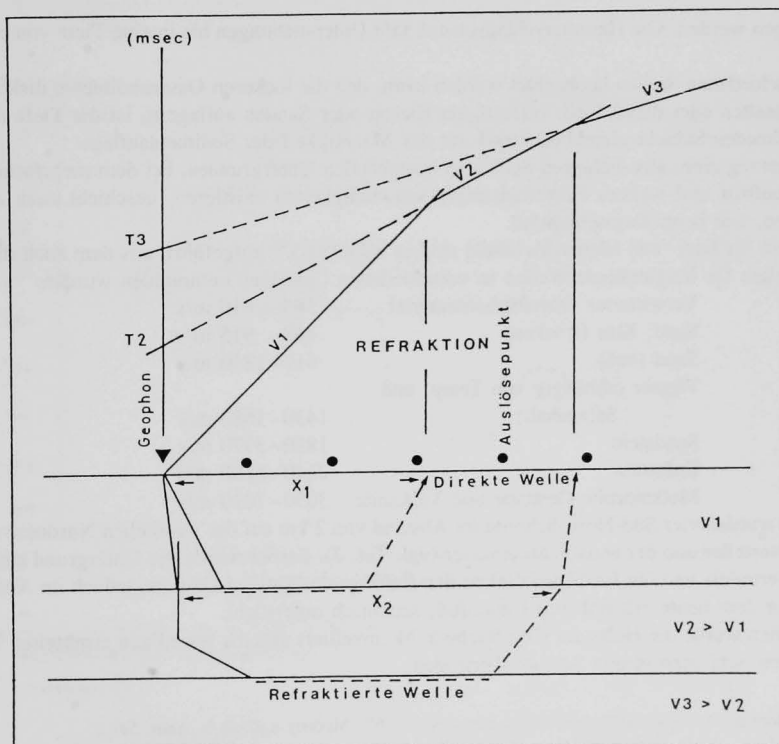


Abb. 11. Idealisierter Schnitt durch den Untergrund zur Veranschaulichung des Verlaufs der direkten und der refraktierten Welle⁵⁹.

Praktisch werden bei der Refraktionsseismik, zu der die angewendete Hammerschlagseismik zählt, die Laufzeiten der Wellen vom sich ändernden Auslösepunkt bis zum Geophon gemessen. Hierbei kommt es nur auf die Ermittlung der Ankunftszeit der ersten Wellenfront an. Diese Ankunftszeiten werden graphisch in Abhängigkeit zur jeweiligen Entfernung Auslösepunkt – Geophon abgebildet. Ab einer bestimmten Distanz vom Auslösepunkt überholen die refraktierten Wellen die direkt an der Oberfläche laufenden langsamen Wellen.

Die verschiedenen Wellenlaufzeiten stellen sich im Weg-Zeit-Diagramm als Lineare mit unterschiedlicher Steigung dar, die sich im Knick- oder Überholungspunkt schneiden.

Aus der Entfernung x des Knickpunktes vom Ursprung läßt sich für den einfachen Zweischichtfall nach der Beziehung

$$h = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

die Tiefe der wellenbrechenden Schicht bestimmen. Für den Zweischichtfall kann auch die Beziehung

$$h = \frac{T_2}{2 \sqrt{\frac{1}{V_1^2} - \frac{1}{V_2^2}}}$$

herangezogen werden. Die Hammerschlagseismik läßt Untersuchungen bis in eine Tiefe von etwa 30 m zu.

Da an verschiedenen Stellen beobachtet werden kann, daß die lockeren Oasensedimente diskordant auf Kalken, Basalten oder durch Kalk verfestigten Kiesen oder Sanden auflagern, ist die Tiefe der ersten wellenbrechenden Schicht gleichbedeutend mit der Mächtigkeit der Sedimentauflage.

Die Auswertung eines aus mehreren Schichten bestehenden Untergrundes, bei dem mehrfache Wellenbrechung auftritt und weitere Fortpflanzungsgeschwindigkeiten existieren, geschieht nach denselben Grundsätzen, wie beim Zweischichtfall.

Die Formeln für Drei- und Mehrschichtfälle sind in MOONEY⁶⁰ aufgeführt, aus dem auch die folgenden Laufzeiten für longitudinale Wellen in verschiedenen Gesteinen entnommen wurden:

Verwittertes Oberflächenmaterial	305– 610 m/s
Sand, Kies (trocken)	468– 915 m/s
Sand (naß)	610–1830 m/s
Wasser (abhängig von Temp. und Salzgehalt)	1430–1680 m/s
Sandstein	1830–3970 m/s
Kalkstein	2140–6100 m/s
Metamorphe Gesteine und Vulkanite	3050–7020 m/s

Untersucht wurden vier Süd-Nord-Schnitte im Abstand von 2 km auf der westlichen Nordoase zwischen dem Hauptverteiler und der antiken Stadtmauer (vgl. Taf. 3). Ferner wurde der Untergrund am Standort des Hauptverters und ein Profil parallel zu den Relikten des antiken Damms, jedoch im Abstand von 5–10 m vor dem heute erkennbaren Dammfuß, seismisch untersucht.

In allen Fällen wurde die Höhe der Oberfläche ü. M. nivelliert und die jeweiligen ermittelten Tieflagen der dichteren Schichten in den Schnitt übertragen.

59 H. M. Mooney, Handbook of Engineering Geophysics, Chapter 1–12. Bison Instruments Inc., Minneapolis, 1977.

60 Mooney a.O. (s. o. Anm. 59).

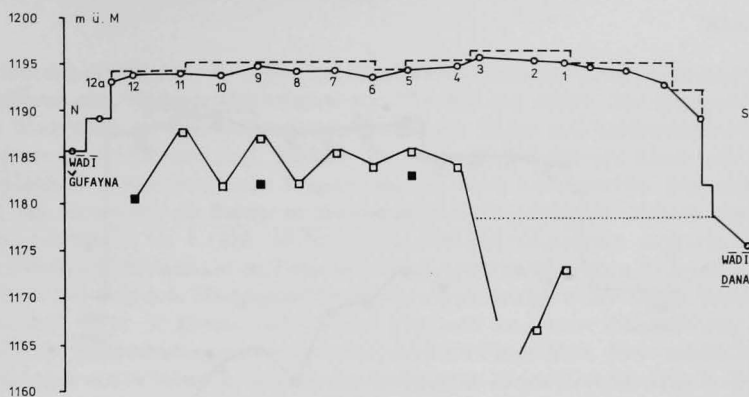


Abb. 12. Nordoase Schnitt 1.

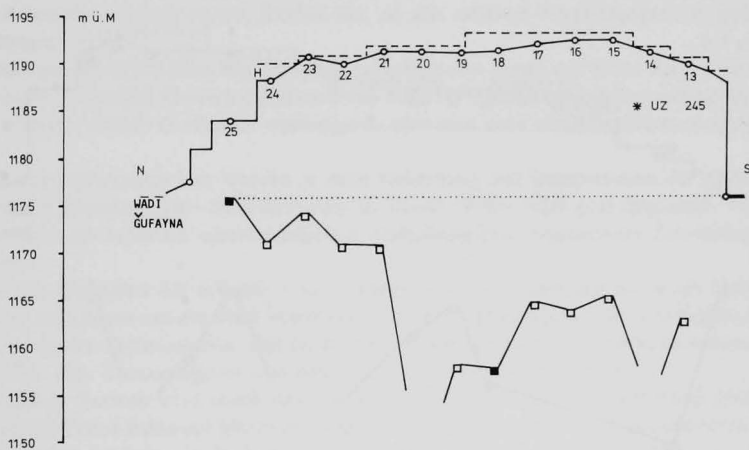


Abb. 13. Nordoase Schnitt 2.

- FESTKÖRPERGESTEIN (BASALT ODER KALK)
 □ LOCKERGESTEIN

0 200 400 m

- ANTIKE TOPOGRAPHIE [TERRASSE]
 — AKTUELLE TOPOGRAPHIE
 REKONSTRUIERTE BASISFLÄCHE
 — SEISMISCH ERKENNBARER UNTERGRUND
 * RADIOKARBONPROBE

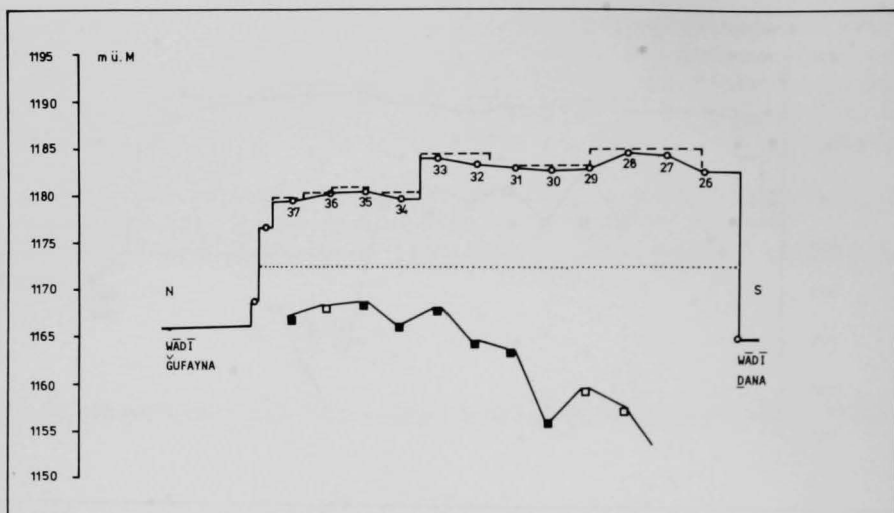


Abb. 14. Nordoase Schnitt 3.

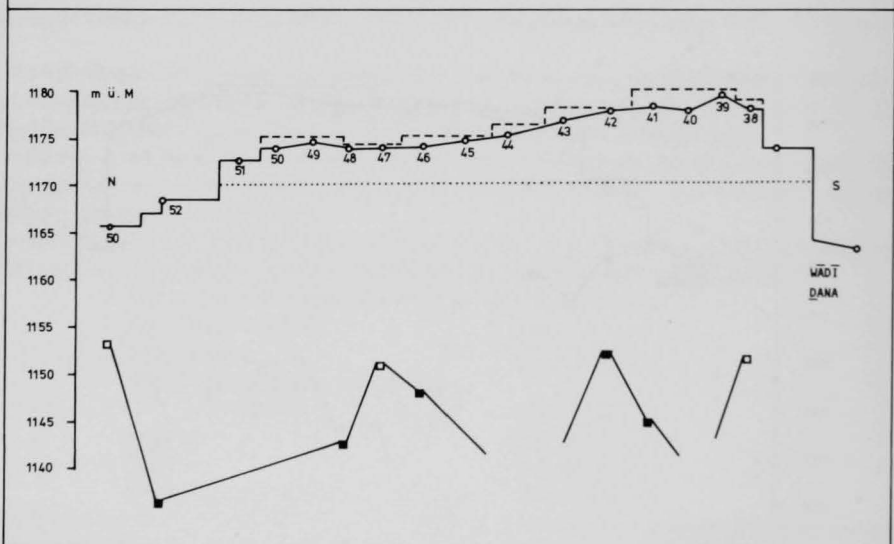
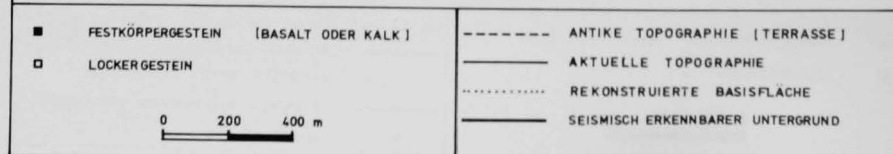


Abb. 15. Nordoase Schnitt 4.



1.5.6.2 Ergebnis der seismischen Untersuchungen

a) Oase

Generell läßt sich die Situation der Oase als Zweischichtfall schildern, wobei das lockere lößartige Oberflächensediment eine Wellengeschwindigkeit von 270–400 m/s besitzt. Die darunterliegende Schicht wird von Materialien verschiedenster Zusammensetzung, Dichte und Laufzeitengeschwindigkeit, die jedoch immer über 1200 m/s liegt, gebildet. Zu erwarten sind alluviale Sande und Kies des Wadi Dana mesozoische Kalke, basaltische Eruptiva und der durch *carbonatisches* Bindemittel zementierte Lavagrus, der ebenso wie die Basalte an die unmittelbare Umgebung der Vulkane gebunden ist.

Die in den Schnitten 1 bis 4 (Abb. 12 bis 15) im einzelnen dargestellte, ungleiche Mächtigkeit der schwemmlößartigen Sedimente ist die Folge der vorgeformten zertalten alten Basis und der auflagernden Basaltströme. Die maximale Mächtigkeit der Ablagerungen beträgt in den beiden Rinnen der früheren Flußbetten über 33 m. In diesem Tiefenbereich liegt auch die Grenze der Auflösung und damit der Anwendung der Hammerschlagseismik mit einem Gerät der Firma Bison. Eine zusätzliche Kontrolle der Ergebnisse ergab sich in Schnitt 2 zwischen den Meßpunkten 16 und 17 durch einen im Bau befindlichen Brunnen. Dort stieß man in 29 m Tiefe auf hellen Sand der sich oberflächlich nicht von dem heute im Wadi Dana abgelagerten Sand unterscheiden läßt. Die Tiefenlage der Trennschicht unter dem Oasen-sediment betrug bei Punkt 16 rund 29 m und bei Punkt 17 etwa 27 m, so daß von einem hohen Maß an Genauigkeit bei den ermittelten Werten ausgegangen werden kann. Messungen in verschiedenen Brunnen zeigen den Beginn des Grundwasserspiegels bei etwa 35 m unter der Geländeoberkante.

Grundsätzlich läßt sich also festhalten, daß der grundwassergefüllte Porenraum auf die Laufzeitengeschwindigkeiten der refraktierten Wellen und somit auf die Ergebnisse der seismischen Untersuchungen und deren Genauigkeit keinen Einfluß hat, da alle erfaßten Verdichtungen im grundwasserfreien Bereich liegen.

Untersuchungen im Wadi Dana ergaben für die abgelagerten Sande und Kiese unter einer lockeren Auflage von 1,10 m ebenfalls Geschwindigkeiten von 1200 bis 1800 m/s, so daß es sich bei der Trennschicht um den teilweise durch *Carbonate* verfestigten, pluvialen oder tertiären Schwemmfächer des Wadis handelt.

Höhere Laufgeschwindigkeiten wurden je nach Umgebung und Interpretation der geologischen Karte entweder als Kalkstein (2140–6100 m/s) oder als Basalt (3050–7020 m/s) eingestuft, wobei die großen Schwankungen ein Ausdruck unterschiedlicher Ausbildung bzw. beginnender Zersetzung des Materials sein können.

Aufgrund der Meßdaten der Schnitte 1 bis 4 wurde eine topographische Karte des Gebietes zwischen dem antiken Staudamm und der Stadt Märüb erstellt, die die Morphologie vor dem Beginn der natürlichen und anthropogenen Sedimentation, daß heißt ohne die auflagernden lößähnlichen Lockersedimente zeigt (Taf. 3, Abb. 16). Chronologisch sind dabei zwei Zustände zu betrachten:

1. Die früheste Periode wird durch das Flußtal dokumentiert, das im Untergrund geradlinig aus der Schlucht im Ġabal Balaq auf Märüb zu verläuft. Während das rechte Ufer von pluvialen Ablagerungen gebildet wird, ist links ein Steilufer vorhanden, das zu einer Hochfläche führt (5–10 m über dem rechten Uferniveau), die überwiegend aus basaltischen Laven besteht. Gelegentlich sind jedoch auch zwischen den Basaltströmen bzw. auch auf der Lava weniger dichte Ablagerungen, vermutlich Verwitterungsprodukte, vorhanden. Einer dieser Lavaströme verläuft vom Nordwesten unter dem Standort des Hauptverteilers hindurch zu der Böschung am Wadiufer. Ob er dort in das Flußbett stürzt und ihm an der tiefsten Stelle Richtung Märüb folgt, oder ob er auf dem Hochplateau ausläuft, konnte nicht geklärt werden. Jedenfalls deuten hohe Wellengeschwindigkeiten in dem Flußtal (Punkt 18, Abb. 13) mit 3350 m/s auf einen Festkörper, bei dem es sich allerdings auch um einen Kalkhorst handeln kann. Größere Behinderungen des Abflusses sind von diesem Gestein vermutlich nicht ausgegangen. Etwa 1300 m südlich des Klus existiert ein zweites, tief eingeschnittenes Flußtal, dessen beide Ufer

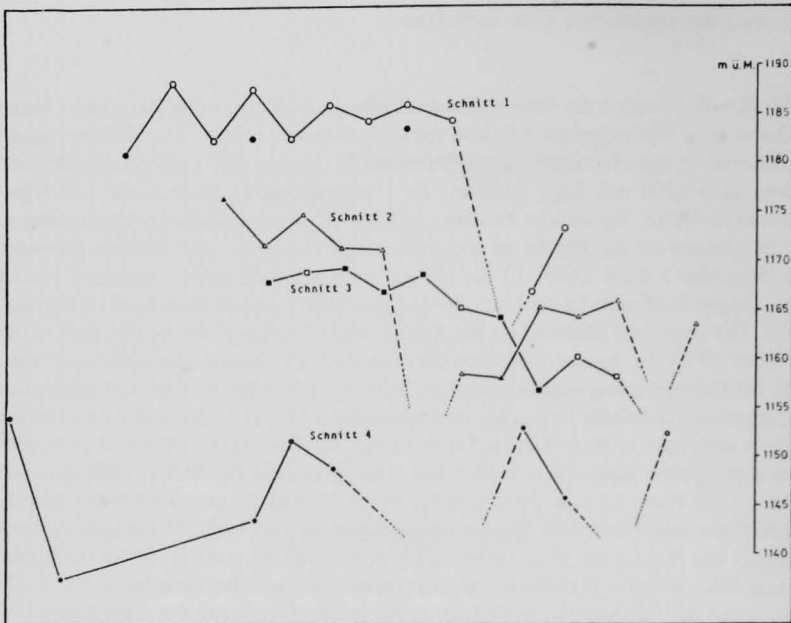


Abb. 16. Projektion des seismisch erkennbaren Untergrundes der Schnitte 1 bis 4.

aus pluvialen Sedimenten bestehen und das von einem ausschließlich im Ġabal Balaq al-Ausaṭ liegenden, wesentlich kleineren Einzugsgebiet gespeist wurde. Auch hier sind insgesamt über 33 m Sedimente akkumuliert.

Kurz vor Mārib vereinigen sich diese beiden Flußtalssysteme mit dem Wādī 'Alib zu einer weiten Ebene, aus welcher der die Stadt Mārib tragende Tell hoch aufragt. Westlich und nördlich der antiken Stadtmauer sind in 20 bis 30 m Tiefe dichte Gesteine mit Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten von 3500–5000 m/s angetroffen worden, die mit keiner bekannten Struktur in Verbindung gebracht werden können. Die Form des Hügels erinnert an einen Vulkankegel, so daß sich folgende Erklärung anbietet: An der Schnittstelle der beiden, auf tiefgreifenden tektonischen Störungen verlaufenden, Talsysteme wurde der Aufstieg von magmatischem Material ermöglicht, so daß an dieser Stelle ein Vulkan entstand, von dem mehrere Basaltströme (mindestens jedoch zwei, je einer nach Westen und nach Norden) zu Tal flossen (vgl. Taf. 3).

Mit dem Nachlassen der Niederschläge im Einzugsgebiet und der Wasserführung des Wādī Dana fand eine beträchtliche natürliche Aufsedimentation des Flußbettes statt. Das Resultat muß eine relativ ebene Fläche südlich des Hochplateaus am Hauptverteiler gewesen sein, denn bei noch vorhandener ausgeprägter Morphologie wäre eine Quering des Flußbettes durch einen Lavastrom unmöglich gewesen.

2. Der Lavastrom überquerte auf Höhe des Bauwerks N 4 das eingeebnete Flußbett nach Süden und ist bis unterhalb von Bau N 5 aufgeschlossen (Abb. 10). Diese aus dem natürlichen Gelände herausragende Basaltschwelle verursachte die nach Süden gerichtete Umlenkung des Wādī Dana nach dem Austritt aus dem Gebirge, während das Grundwasser weiterhin, wie die Brunnen im nördlichen Oasenteil beweisen, die Möglichkeit besitzt, den Lavastrom zu unterfließen und dem alten Grundwasserleiter zu folgen.

Da es sich um das Ende des Basaltstromes handelt, wird angenommen, daß er die Ebene lediglich um 1–2 m überragte. Die Bauwerke N 4 (Schwellenhöhe 1181,60 m ü. M.) und N 5 (Schwellenhöhe 1180,20 m ü. M.) sind jeweils auf diesem festen Gestein gegründet, so daß für die akkumulierte Basisfläche eine Höhe von 1178–1179 m ü. M. bei N 4 und 1177 bis 1178 m ü. M. bei N 5 postuliert wird.

Da es sehr unwahrscheinlich ist, daß die dem Wadigefälle entsprechende eingeebnete Fläche, eine stärkere Neigung als 1–2‰ besaß, können mit Hilfe dieser Annahme in allen Schnitten die Oasenbasisflächen vor Aufnahme der anthropogenen Bewässerung bestimmt und eingetragen werden.

Durch die Projektion der konstruierten Bewässerungsbasis in die Schnitte 1 bis 4 lassen sich für diese Gebiete die maximalen Sedimentmächtigkeiten angeben:

Schnitt 1 = 17,2 m Oasensedimente (Abb. 12)

Schnitt 2 = 17,7 m Oasensedimente (Abb. 13)

Schnitt 3 = 12,0 m Oasensedimente (Abb. 14)

Schnitt 4 = 9,7 m Oasensedimente (Abb. 15)

Alle diese Werte basieren auf einem angenommenen mittleren Gefälle von 1,5‰ der eingeebneten Fläche.

An dieser Stelle muß daher BRUNNER⁶¹ widersprochen werden, der über 30 m Bewässerungssedimente angibt und eine jährliche Sedimentationsrate von 1,1 cm annimmt.

Die ergänzten Abbildungen zeigen, daß der größte Teil der oasenähnlichen Lockersedimente, die dem seismisch deutlich unterscheidbaren Untergrund auflagern, besonders im östlichen Teil schon vor Aufnahme der Bewässerung existierten. Während im westlichen zentralen Teil um den Hauptverteiler eine mächtige, einheitlich entwickelte Oase vorliegt, wird nach Osten die Dicke der Sedimentauflage dünner. Das bedeutet, daß das Hauptverteilersystem in einen zentralen westlichen, vermutlich kontinuierlich bewässerten Teil und in einen östlichen, unregelmäßig oder zeitlich später genutzten Teil untergliedert werden kann.

Aus der maximalen Sedimentmächtigkeit von ca. 18 m und der ermittelten Sedimentationsrate von 0,7 cm/a (vgl. Kap. 3.4) läßt sich eine Betriebsdauer der Nordoase von etwa 2550 Jahren errechnen. Der Flußlauf führte nach der Umbiegung nach Süden am Fuß des Ġabal Balaq entlang, bis er auf Höhe von Bau S 6, durch die bis in das heutige Flußbett anstehenden Kalke wieder in die ursprüngliche Richtung nach Mārib abgelenkt wurde. Dabei machte sich der Fluß das schon vorhandene Tal zunutze, welches nun ebenfalls regressiv aufsedimentiert wurde.

Auf Grund der in diesem Bereich von der heutigen Situation abweichenden Lage des Wādī Dana, die offensichtlich zu Beginn der sabäischen Bewässerung noch Gültigkeit besaß, was durch die im Vergleich zum rezenten Stromstrich auffällig verdrehte Lage des Bauwerks S 6 unterstrichen wird, hatten die Nord- und die Südoase andere Ausdehnungen. So reichte die Südoase anfänglich weiter nach Norden, bis an den Wadilauf der Situation II (Taf. 3). Wahrscheinlich waren zu diesem Zeitpunkt Bewässerungsflächen nördlich des Wadis noch nicht angelegt, so daß der vom Bauwerk S 6 versorgte nördliche Teil der Südoase mit dem mehrfach in den Felsen am Bauwerk gemeißelte Begriff „byn“ (Nordoase, mdl. Mitteilung von Prof. W. W. MÜLLER) gemeint sein könnte (Abb. 17).

Im Laufe der Betriebszeit, wahrscheinlich nach der Errichtung des Absperrdammes, wurde das Wadi-bett von den Betreibern nach Süden verlegt (Situation III, Taf. 3), so daß seither der rezente Flußlauf und die damit verbundene veränderte Nord- bzw. Südbegrenzung der beiden Oasenteile annähernd existierte.

61 Brunner a.O. (s. o. Anm. 1), S. 122.

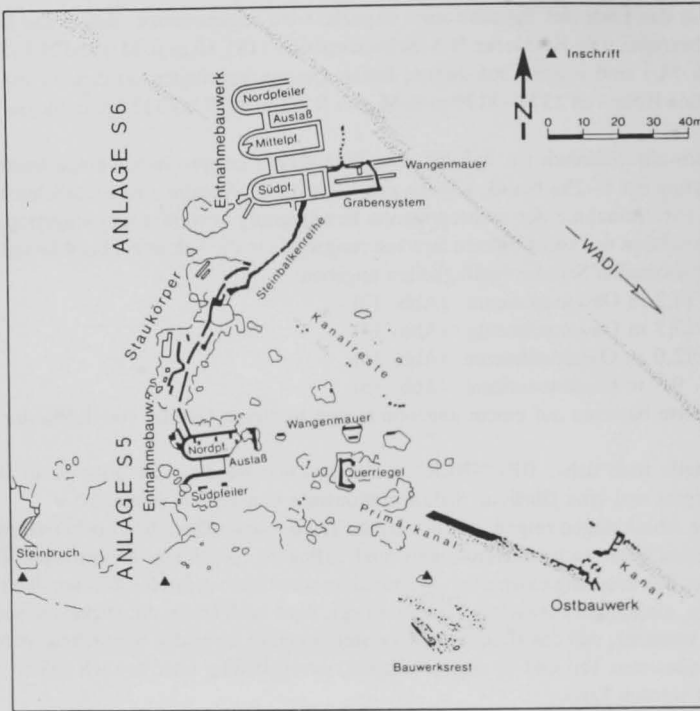


Abb. 17. Lageplanskizze der Baukomplexe S 6 und S 5⁶².

b) Damm

Zwischen dem Beginn der nachweisbaren Bewässerung der Nordoase mit dem Entnahmebauwerk N 4 (Abb. 1, Höhe der Sohlschwelle 1181,60 m ü. M.) im Wādī Dana und deren Ende mit dem Nordbau N 1 der Betriebsperiode 1 (Schwellenhöhe 1195,99 m ü. M.) liegt eine Höhendifferenz von ca. 14 m, die durch die stetige Aufsedimentation der Oase erforderlich wurde. Das zur Bewässerung benötigte Wasserspiegelniveau wurde durch eine schrittweise Erhöhung des Staudammes erreicht. Zu jeder dieser Perioden gehörte ein bestimmtes Auslaßbauwerk. Die Standorte dieser Bauwerke sind unbekannt, da alle Spuren von den Sedimenten der letzten Periode überdeckt werden. Lediglich die Sedimentreste älterer Hauptkanäle deuten die Existenz früherer Nordbauten an, die jeweils durch einen Hauptkanal mit dem dazugehörigen Hauptverteiler an Stelle des heute sichtbaren in Verbindung gestanden haben.

Voraussetzung für die Gründung solcher Bauten war aber die Existenz von festem Baugrund, der in diesem Fall nur aus anstehendem Fels bestehen konnte, weil die bautechnischen Eigenschaften des Sediments aufgrund des hohen Porenvolumens und des damit möglichen hohen Wassergehaltes wenig standfest sind. Dieses Wissen lokalisiert die möglichen Standorte früherer Bauwerke auf das Gebiet am Fuße des Ġabal Balaq im letzten Dammbereich. Durch die Hammerschlagseismik vor dem Dammfuß sollte

62 Nach W. Herberg, Vorläufiger Bericht über baugeschichtliche Untersuchungen des Baukomplexes B

im Wādī Dana, Marib, in Archäologische Berichte aus dem Yemen III, 1987, S. 33–57.

der Nachweis erbracht werden, daß zwischen dem Wadi und dem Standort des Bauwerks N 1 im Untergrund die Voraussetzungen (fester Fels) zur Errichtung größerer Anlagen vorhanden sind.

Tatsächlich sind an den zwei Stellen, die in der Abbildung 2 mit N 3 und N 2 bezeichnet sind, Schichten mit Wellenlaufzeitengeschwindigkeiten von 3500 bzw. 3300 m/s gefunden worden. Aufgrund der Örtlichkeiten und der Geologie werden diese Schichten als Ausläufer der Kalke des Ġabal Balaq gedeutet, während die dazwischenliegenden Bereiche an der Störungsfront tiefer abgesenkt wurden.

Der südliche Horst, Standort des Bauwerks N 3, ist 10 m vor dem Dammfuß in 10 m Tiefe bei 1178 m ü. M., und der nördliche (Standort des Bauwerks N 2) in 4 m Tiefe bei 1187 m ü. M., ebenfalls 10 m vor dem Dammfuß anzutreffen. Beide Lokalitäten sind als Standorte für größere Bauwerke möglich, dennoch kann nur am südlichen Punkt die unmittelbar auf N 4 folgende Bewässerungsanlage N 3 gestanden haben, da nur dort Gründungen in Höhen zwischen 1181 und 1187 m ü. M. existieren konnten. Der nördliche Punkt ist zusätzlich noch durch das Streichen der schon erwähnten Kanalreste als Standort des Bauwerks N 2 gekennzeichnet. Die Verlegung der Auslaßbauwerke nach Norden machte allerdings eine beträchtliche Verlängerung des Dammes erforderlich.

c) Hauptverteiler

Die schon erwähnten Kanalrelikte laufen alle auf den Hauptverteiler der letzten Bewässerungsperiode I zu, so daß sich die Frage stellt, ob in früheren Perioden (II bzw. III) Vorgängeranlagen an gleicher Stelle bestanden haben können. Diese Frage ist grundsätzlich positiv zu beantworten, da 12–14 m unter dem Hauptverteiler in 1182–1184 m ü. M. Höhe eine Schicht anzutreffen ist, in der die refraktierte Welle Geschwindigkeiten von 3500–4000 m/s erreicht. Solche Wellenlaufzeiten können sowohl in Kalken als auch in basaltischer Lava erzielt werden, die beide in unmittelbarer Umgebung vorkommen. Jedoch wurde bei der Deutung mit Hilfe des Luftbildes der Existenz eines Lavastromes vom Ġibāl Daš al-Ḥašab, der sich bis unter den Hauptverteiler erstreckt, der Vorzug gegeben. Letztlich kann die Frage jedoch nur mit einer Bohrung gelöst werden.

Um den Hauptverteiler, der etwa einen Kilometer vom Damm entfernt liegt und auf einer Basis von 1182–1184 m ü. M. gegründet werden konnte, mit freiem Wasserspiegelgefälle zu erreichen, ist bei einer Neigung von 1‰ im Hauptkanal ein Wasserspiegelniveau von mindestens 1183–1185 m ü. M. im Stauraum nötig.

Damit fällt der Bau des Hauptverteilers höhenmäßig mit der Anlage N 3 zusammen. Bei der nachfolgenden Erhöhung der Nordbauten wurde vermutlich auch der Hauptverteiler erhöht bzw. durch einen Neubau ersetzt, der auf dem Vorgänger aufbaute und somit ein solides Fundament besaß. Grabungen in der Kampagne 84/85 förderten in 2,6 m Tiefe (1194,43 m ü. M.) Kalkspolien zum Vorschein, die jedoch eine weitere Grabung verhinderten.

1.5.7 Erosion

Die bei den gegebenen Klimabedingungen anfallenden Verwitterungsprodukte werden von dem während der beiden Regenzeiten oberflächlich abfließenden Niederschlagswasser umgelagert und erodiert. Die Menge der vom Wasser transportierten Sedimente ist in erster Linie von der Niederschlagsintensität und der beregneten Fläche abhängig. Die Schwankungsbreite der Sedimentbelastung des Wadis zur Regenzeit wächst mit der Größe der beregneten Fläche. Besonders in den Partien des Gebirges mit steilerem Relief ist die Erosion wirksam. Dementgegen wirkt die Terrassierung der Hänge in den von den Yemeniten intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebieten, wodurch der Oberflächenabfluß und damit die fluviale Umlagerung der Verwitterungsprodukte in diesen Bereich auf ein Minimum beschränkt werden. Das Becken der Wüste wird heutzutage fluvialit überwiegend nur von Feinsedimenten erreicht. Die Flußsedimente (vorwiegend Sande) unterscheiden sich markant von den zumeist aus größerem Material auf-

gebauten Talhängen des Ġabal Balaq al-Auṣaṭ und des Ġabal Balaq al-Qiblī oder des Ġibāl Daṣ al-Ḥaṣab. Die mineralogische Zusammensetzung der transportierten Sedimente hängt weitgehend von den im Einzugsgebiet anstehenden Gesteinen und deren Verwitterungsresistenz ab. Da ein großer Teil von basischen Vulkaniten und mesozoischen Kalken gebildet wird, handelt es sich bei dem erodierten Material um fruchtbare Sedimente mit reicher Mineralreserve.

a) Oase

Nach der Aufgabe der Oasen bzw. nach dem letzten Dammbruch bestand bis in die heutige Zeit keine Möglichkeit, planmäßig Wasser auf die erhöhten Feldflächen zu bringen und gezielt Landwirtschaft zu betreiben. Lediglich im Wadi konnte noch regelmäßig, und nach Regenfällen zusätzlich in Erosionsrinnen gelegentlich, Ackerbau betrieben werden. Erst mit der Einführung der Grundwasserförderung durch Brunnen setzte die Nutzung der Oberfläche wieder ein. In der Zwischenzeit war die Oase der Bodenerosion ausgesetzt.

Dieser Prozeß bedeutete die Verlagerung von Teilen der oberen Bodenlage oder des gesamten Bodens und umfaßt die Mobilisierung und den Transport von Teilchen durch Wind und Wasser. Die Widerstandskraft des Bodens gegen Erosion hängt wesentlich von der Zusammensetzung, Verkittung und vom Aufbau der Kolloide ab, also in erster Linie von Textur und Struktur des Bodens.

Böden mit überwiegend groben Fraktionen besitzen eine geringere Feldkapazität und trocknen schnell aus. Sie zeigen durchweg eine hohe Anfälligkeit gegenüber Abtrag durch Wind, aufgrund ihrer hohen Infiltrationskapazität sind sie jedoch weniger anfällig gegen Wassererosion. Dominieren die feinen Fraktionen, besitzt ein solcher Boden in der Regel zwar die Fähigkeit zur Bildung von Aggregaten, er verliert aber mit zunehmendem Tonanteil seine Permeabilität. Dies führt zu erhöhten Abflußraten und damit zu steigendem Bodenabtrag.

Je ausgeglichener die Verteilung aller Korngrößengruppen ist, desto geringer ist die Erodierbarkeit. Dies basiert auf der Senkung der Abflußrate infolge erhöhter Wasseraufnahmefähigkeit und auf der Schaffung schwerer, der Transportkraft von Wind und Wasser widerstehender Bodenaggregate.

Da der Wind nur trockene Böden erodiert, muß in diesem Gebiet mit gelegentlichen Niederschlägen der Winderosion (Schichterrosion) die größere Rolle zugesprochen werden.

Starke Austrocknung des Bodens und geringer Zusammenhalt durch die spärliche Vegetation begünstigen die Mobilisierung des Bodens. Pflanzenarme Böden sind der atmosphärischen Verwitterung schutzlos ausgesetzt. Für die Abtragung durch den Wind ist neben Größe und Gewicht der Teilchen auch die Windgeschwindigkeit verantwortlich. Dabei lassen sich zwei Arten unterscheiden: Deflation und Korrasion. Bei folgenden Windgeschwindigkeiten werden Staub- und Sandkörner bewegt⁶³:

	Korngröße mm	Windgeschwindigkeit m/sec	Windstärke
Staub	0,01–0,05	0,1– 0,5	0
Feinsand	0,1	1 – 1,5	1
Mittl. Sand	0,5	5 – 6	4
Grober Sand	1	10 – 12	6

Wird die entsprechende Windgeschwindigkeit unterschritten, sedimentieren die zugehörigen Körner wieder. Lediglich das feinste Material bleibt in der Luft suspendiert und kann in Staubwolken kontinentweit verweht werden.

Die tonig-schluffigen Krusten der Oasensedimente erschweren, auch wenn sie sehr dünn sind, den Angriff des Windes auf das lockere, darunterliegende Sediment. Wird diese Schutzschicht durch Mensch oder Tier zerstört, setzt an diesem Punkt sofort kräftige Deflation ein. Letztlich bleiben nur noch vereinzelte Hügel übrig, auf denen Verteilerbauwerke stehen oder die durch höheren Humusgehalt einen stärkeren Zusammenhalt besitzen.

Durch die vorherrschende Winderosion ist eine verstärkte Abtragung in höhergelegene Lagen zu beobachten. Während in den tiefer gelegenen oder randlichen Partien der in Terrassen entstandenen Oasen (z. B. am Rand der Südoase zum Ġabal Balaq hin) die Wasserverteilerbauwerke die umgebenden Feldflächen kaum überragen, also auf eine direkte Zusammengehörigkeit Verteiler – Feldfläche und damit auf eine minimale Erosion geschlossen werden kann, muß in den zentralen Lagen auf Grund der stark erhöhten Position der Verteiler eine sehr viel größere Erosionsrate angenommen werden. Dadurch ist die Zuordnung der Kanäle und Felder zu den Bauwerken erschwert, zumal die meisten heute sichtbaren Kanäle älteren und tieferliegenden Betriebsperioden zugehörig sind.

Die Bodenabtragung durch fließendes Wasser (Rinnen- und Grabenerosion) kann nur erfolgen, wenn dieses Wasser kinetische Energie besitzt, die in ihrer Größe von der Menge und der Intensität der Niederschläge, von der Neigung des Geländes, der Bodenart und dem Bewuchs abhängt.

Das labile, feinkörnige (ca. 80% Schluff und Ton) Bodengefüge der Oase verschlämmt leicht unter dem Einfluß von Wasser. Dadurch wird die Infiltration erschwert, und nach Abtrocknung verbleibt an der Oberfläche eine tonig-schluffige Kruste, deren Wirkung noch durch den ausgefallenen Kalk erhöht wird, welcher auf die Körner als Bindemittel wirkt. Es bildet sich das typische Kohärenzgefüge aus, das dem lößartigen Sediment die charakteristische Standfestigkeit verleiht. Durch die herabgesetzte Wasseraufnahmefähigkeit muß ein Teil des Regens oberflächlich abfließen. Nur bei sehr geringem Gefälle zieht das auf den Boden auftreffende Regenwasser in Form von Schichtfluten ab, wobei es dann zu einer flächenhaften Erosion kommt.

Meist sammelt sich das Wasser in kleinen Rinnen, die schließlich größer werden und in denen hohe Fließgeschwindigkeiten erzielt werden. So kommt es in den randlichen Oasenbereichen zur Ausbildung zahlreicher gewundener Erosionsrinnen mit steilen Wänden in dem diagenetisch verfestigten Sediment. Diese sogenannten Erosionsgullys schneiden sich teilweise bis zum Untergrund in die Oase ein. Im Bereich des Unterhanges laufen die Erosionsgullys aus, und es findet eine flächenhafte kolluviale Sedimentation des erodierten Materials in Form von geschichteten tonarmen Sanden mit überwiegendem Einzelkorngefüge statt. Diese Rinnenerosion läuft auch gegenwärtig unter vollariden Verhältnissen ab.

Die Ermittlung des Erosionsbetrages ist für die Feststellung der maximalen Oasenmächtigkeit am Ende der historischen Betriebszeit von großer Wichtigkeit. Denn nur die Kenntnis der Sedimentmächtigkeit und der jährlichen Sedimentationsrate ermöglicht die Berechnung der relativen Betriebsdauer. Die höchsten Sedimente im allseitig von Mauern umschlossenen Hauptverteiler, in dem Erosion nahezu ausgeschlossen ist, besitzen ein Niveau von 1196,33 m ü. M. Die umgebende Oasenoberfläche in diesem Gebiet schließt heute mit dem Top des Brunnens am Hauptverteiler 1196,13 m ü. M. ab, liegt also nur 0,2 m tiefer. Bei den höchsten Sedimentresten der Nordoase (1197,74 m ü. M.) etwa 300 m nördlich der Anlage handelt es sich um Kanalreste, die nicht unbedingt einen Schluß auf die Höhe der Feldflächen zulassen. Jedoch ist vorauszusetzen, daß die zugehörigen Bewässerungsgebiete wegen der schnelleren Aufsedimentation der Kanäle niedriger gewesen sein müssen. Daraus ist das Fazit zu ziehen, daß seit der Aufgabe der Oase im westlichen Teil des Hauptverteiler-Systems eine maximale Erosion von 1,60 m stattgefunden haben kann. Der tatsächliche Erosionsbetrag jedoch ist wahrscheinlich niedriger, es ist von einem Wert von etwa 1 m auszugehen (vgl. Kap. 2.6.3). In einigen Gebieten wird dieser Wert unterschritten, wenn, wie schon erwähnt, z. B. auf der Südoase der Ġabal Balaq al-Ausaf Windschutz bietet.

Dagegen können am Rande der Wadis, vor allem am Wādī Dana, durch zusätzlichen Oberflächenabfluß bei den gelegentlichen Regenfällen durchaus Erosionsbeträge von 3–4 m auftreten.

b) Wādī Dana

Einen besonderen Stellenwert nimmt bei der Beschreibung der Erosionsvorgänge das Wādī Dana ein, dessen Lage sich durch geogene oder anthropogene Ursachen im Laufe der Zeit veränderte. Die anthropogene Bewässerung begann auf einer vom Wadi geschaffenen Sandschwemmebene. Die beschriebene Ermittlung der Bewässerungsbasis und die Projektion dieser Fläche in die seismischen Schnitte ergibt z. T. eklatante Unterschiede zum heutigen Wadiniveau, z. B. liegt das frühere Wadibett bei S 5/6 (Abb. 12) zwischen 1176–1178,5 m ü. M. (zum Vergleich: heutige Höhe = 1174,5 m ü. M.). Nach Osten nimmt die Differenz noch erheblich zu. Im westlichen Oasenteil (Schnitte 1 und 2) trifft die Basisfläche jeweils mit einem Geländeknick am Wādī Dana zusammen, was grundsätzlich die Existenz dieser Fläche bestätigt. Nach dem Bau des Dammes könnte das Wadi sogar noch weiter aufsedimentiert worden sein, da die planmäßige Verteilung des Flußwassers über so große Flächen eine erhebliche Änderung sowohl des Abflusses als auch der Sedimentation bedingte. Später nach dem letzten Dammbruch begann erst die Tiefenerosion des Flusses. Die am Wadirand gelegenen Terrassen, auf denen bis zu 10 cm große Gerölle zu finden sind, geben Zeugnis über frühere Wadiniveaus. Dieses ungewöhnliche Verhalten des Wadis, erst Akkumulation, dann Tiefenerosion, ist vermutlich auf Klimaänderungen oder auf Krustenbewegungen im Bereich der innerarabischen Wüste oder/und im zentralen Yemenitischen Hochland zurückzuführen. Die günstigen Voraussetzungen für eine Oasenanlage an dieser Stelle könnten durch den zeitweisen Stillstand einer seit dem Jura andauernden tektonischen Bewegung entstanden sein.

Allem Anschein nach war die Senkungstendenz des Wüstenbeckens bzw. die Hebungstendenz des Hochlandes vor Anlage der Oase außer Kraft, so daß die Sedimente zuerst das Becken auffüllten und später die Landschaft einebneten. Diese Ablagerungen sind von den hangenden anthropogenen Bewässerungssedimenten nicht zu unterscheiden.

Noch während des Betriebs bzw. nach Aufgabe der Oase setzte die Senkung des Beckens oder die Hebung des Gebirges in dem Erdbebengebiet wieder ein. Damit begann auch erneut die Tiefenerosion, die offensichtlich heute noch anhält. Durch die Versteilung des Wadilaufs werden die Transportkraft und die Fließgeschwindigkeit des Wassers erhöht, so daß im Wadi derzeit Sande und kleinere Kiese sedimentieren. Identisch erscheinende Ablagerungen bilden aber auch den seismisch erkennbaren Untergrund, der dem Grundwasser als Leiter dient und früheren Pluvialzeiten zugeordnet wird.

Ebenso bilden sandreiche Sedimente die jeweils letzten Ablagerungen auf der Süd- und Nordoase. Da sich der Sandgehalt kontinuierlich über die verschiedenen Betriebsperioden steigerte, sind höhere Fließgeschwindigkeiten und eine langsam gestiegene Erosionskraft des Wadis im Einzugsgebiet anzunehmen. Für diesen Prozeß könnten Hebungen der Erdkruste im Hochland verantwortlich sein, so daß gezogene Entwicklungen Einfluß auf Funktion und Effektivität des Bewässerungssystems gehabt haben könnten. Seit der Aufgabe der Oase hat sich das Bett des Wadis zwischen den beiden Oasenhälften nicht oder nur sehr wenig verlagert. Es hat sich jedoch tief in die Ablagerungen eingeschnitten. Während das Wadi vor der Anlage der Oase bei Bau N 4 das gleiche Höhenniveau besaß wie heute, verstärkt sich die Erosion deutlich nach Osten, d. h. der Untergrund senkt sich zum Zentrum der Arabischen Wüste. Besonders deutlich tritt dieses Phänomen in den Profilen 3 und 4 zu Tage (Abb. 14 und 15).

Dort streicht die angenommene Bewässerungsbasis auf halber Höhe aus der senkrechten Sedimentwand aus. Solche markanten Steilwände an beiden Oasenteilen entstehen durch Unterspülung der Oase bei besonderen Hochwasserereignissen.

1.5.8 Auswirkungen der tektonischen Bewegungen auf den Oasenbetrieb

Die Lage Märibs in einem Langzeit-Senkungsgebiet und am Rande eines subrezenten Vulkan- und rezenten Erdbebengebietes wirft die Frage auf, ob die tektonischen Bewegungen der Erdkruste Auswirkungen auf den Bewässerungsbetrieb der antiken Oase Märib gehabt haben können. Die starken geologischen Kräfte, die auf Verschiebungen benachbarter Schollen der Kruste zurückgehen, bestehen neben einer vertikalen fast immer auch aus einer horizontalen Komponente.

Erdbeben treten plötzlich auf und können furchtbare Folgen für die Oberfläche nach sich ziehen (Taf. 4b), so daß es durchaus möglich wäre, daß ein solches Ereignis den geschütteten Erddamm der Stauanlage zerstört hat und daher die Bewirtschaftung der Oase durch die Sabäer zeitweise unterbunden wurde. An der Oasenoberfläche sind steilstehende Störungen zu beobachten, die über längere Distanzen gradlinig in bestimmte Richtungen verlaufen (Taf. 4c). Sie durchqueren alle anthropogenen Strukturen (z. B. Feldwälle). An den Schnittpunkten der Lineamente mit verschiedenen Richtungen sind oftmals Löcher entstanden. Aber auch im Streichen einer Störung sind Risse von unterschiedlicher Breite, Länge und Tiefe zu erkennen. Meistens sind die lotrechten Spalten jedoch vollständig mit umgelagertem Oasenmaterial gefüllt. Die Kraft, die mächtige Sedimentauflage der Oase über die gesamte Höhe zu zerschneiden, ist nur größeren Schollenbewegungen der Erdkruste zuzutrauen. Die Richtung dieser Erdbebenklüfte gibt Auskunft über die seit historischer Zeit aktiven tektonischen Störungssysteme.

Die Streichrichtungen von 91 Klüften wurden ermittelt, wobei lediglich nicht sekundär verfüllte Klüfte berücksichtigt wurden, die stärkere Erdbewegungen repräsentieren. Dabei kristallisieren sich drei Hauptrichtungen heraus:

45 Klüfte streichen $230^\circ \pm 30^\circ$

37 Klüfte streichen $310^\circ \pm 30^\circ$

7 Klüfte streichen $195^\circ \pm 20^\circ$

Dieses Resultat zeigt, daß die rezenten tektonischen Bewegungen in Südarabien in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Einbruch des Großen Grabensystems seit dem Alttertiär stehen. Dominierend sind die Richtungen des Adengolf-Grabens (ca. 225°) und Rote-Meer-Grabens (ca. 315°), was bei deren Nähe nicht verwundert. Überraschend ist allerdings, daß auch Störungen, die der Richtung des Ostafrikanischen Grabens (ca. 195°) folgen, auf der Arabischen Scholle zu finden sind.

Während das orthogonale Kanalnetz (330° bzw. 240°) im wichtigsten westlichen Teil der Nordoase im wesentlichen den aktiven tektonischen Richtungen des Adengolfs und des Roten Meeres folgt, streicht der Erddamm aufgrund der örtlichen Gegebenheiten mit 350° . Diese Richtung wird von nahezu allen Störungssystemen geschnitten, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines Dammbrechens als Folge eines Erdbebens sicherlich groß ist.

In sabäischen Inschriften werden jedoch lediglich mehrere Dammbüche durch Hochwasser und die Wiederinstandsetzungsarbeiten beschrieben, so daß ein aufgrund eines Erdbebens eingetretener weiterer Dammbuch die Sabäer nicht zur Aufgabe der Oasenbewirtschaftung gezwungen haben wird.

2. Sedimentologische Untersuchungen der anthropogenen Ablagerungen der sabäischen Bewässerungskultur

Neben dem Wasserdargebot, das gefaßt und auf die Feldflächen geleitet werden mußte, bildeten die schon erwähnten mitgeführten Sedimente die Grundlage für die Gründung der landwirtschaftlich genutzten Oase.

Generell lassen sich um Märib zwei große Sedimentationsbereiche unterscheiden: die Staurationssedimente und die Oasensedimente, zu denen auch die Ablagerungen der Hauptzuleitungskanäle gezählt werden. Die Oasensedimente lassen sich in die Ablagerungen der Nord- und Südoase und in die Sedimente des von der Anlage „al-Mabnā“ im Wādī Ġufayna versorgten Bewässerungssystem unterteilen.

2.1 SEDIMENTABLAGERUNGEN IM STAU RAUM

Bei jedem Sayl traten im Stauraum zwei extreme Ablagerungsbereiche auf, zum einen das Gebiet des Stromstrichs, zum anderen die Randbereiche bzw. Stillwasserzonen. Dazwischen waren Übergänge vorhanden. Während im Stromstrich auf Grund der höheren Fließgeschwindigkeit auch gröbere Komponenten sedimentiert wurden, kamen im Randbereich nur die Schwebstoffe zur Ablagerung. Da der größte Teil der Stromstrichsedimente mittlerweile vom Wadi erodiert worden ist, und nur noch der Zufluß zum Nordbau der letzten Periode erhalten ist, müssen die meisten der im Wadidurchbruch heute erhaltenen und angeschnittenen Ablagerungen in die Stillwasserzone eingeordnet werden.

Diese Staurationssedimente zeichnen sich durch feine Korngrößen, horizontale gradierte Lagerung und starke Verfestigung aus. Kennzeichnend sind in den oberen Zentimetern der einzelnen Lagen rötlich-braune Zonen, die vermutlich von feinverteiltem Hämatit und Goethit gefärbt wurden. Selten sind auch helle reine Kalkanreicherungen zu beobachten (Taf. 5a).

Die zyklisch auftretende Rotfärbung zeigt die klimatischen und geochemischen Verhältnisse des Ablagerungsraumes an. Sie entsteht erst nach der Sedimentation und nach dem Trockenfallen des Stauraumes frühdiagenetisch durch autochthone Umwandlung von Eisen II-haltigen Silikaten in der oxidierenden Bodenzonen. Bei den hellen Anreicherungen scheint die Zeitspanne zwischen Trockenfallen und neu eintreffendem Saylwasser nicht groß genug gewesen zu sein, um die Eisensilikate zu oxidieren.

Da die Verfärbung erst nach dem kompletten Versickern und Verdunsten zustande kommen kann, ist die Frage zu klären, wann dieses Phänomen auftritt.

Folgende Größen sind dabei zu beachten:

Versickerung	5–10 cm/d
Verdunstung	150 cm/a oder etwa 0,4 cm/d
Sedimenthöhe	1184,5 m ü. M.
Schwelle im Südbau	1195,5 m ü. M.

im Stauraum verbleibende Wassersäule 11 m
 Zeitraum des Frühjahrssayls April–Mai
 Zeitraum des Sommersayls Juli–August

Aus den Eingangsdaten ist ersichtlich, daß nach Beendigung des lediglich mehrtägigen Abflusses über die Schwelle des Südbauwerks eine Wassersäule von 11 m über dem Sediment im Stauraum verbleibt. Bei Annahme des geringsten Versickerungswertes zuzüglich der Verdunstung ist die Wassersäule nach etwa 200 Tagen, bei Annahme des größten Versickerungswertes zuzüglich Verdunstung nach ungefähr 105 Tagen vollständig verschwunden.

Der Zeitraum zwischen dem Eintreffen des Frühjahr- und Sommersayls beträgt im Durchschnitt 90 Tage. Nur unter der Vermutung, daß der Frühjahrssayl Anfang April und der größere Sommersayl erst Ende August eintreffen bzw. der letztere ganz ausfällt, kann die Forderung des Trockenfallens nach dem Frühjahrssayl erfüllt werden. Obwohl dies nicht ganz auszuschließen, allerdings relativ unwahrscheinlich ist, wird im weiteren davon ausgegangen, daß der Zeitraum zwischen Frühjahr- und Sommersayl zu kurz ist, um ein völliges Verschwinden der Wassersäule zu bewirken. Daraus folgt, daß die Verfärbung erst nach dem Sommersayl möglich ist und daß es sich bei den Ablagerungen zwischen zwei Anreicherungsstreifen um die Ablagerungen zwischen zwei Sommersayls, also eines Jahres handelt.

Jeder Horizont in der Bildmitte (Taf. 5a) setzt sich demnach aus Sedimenten des Frühjahr- und Sommersayl zusammen. Beide wiederum bestehen aus den Ablagerungen der stehenden Wassersäule nach Beendigung des Abflusses über die Schwelle des Südbaus und aus den Sedimentpartikeln, die beim Versickern während des Betriebs mechanisch abfiltriert werden.

Da der Betrieb jedoch sehr kurz (30 Tage beim Sommersayl, 20 Tage beim Frühjahrssayl) und die Versickerungsrate (5–10 cm/d) sehr gering ist, kann der Anteil der abfiltrierten Teilchen an der Schichtdicke vernachlässigt werden. Es wird daher nur die Schwebstofffracht der stehenden Wassersäule nach Beendigung des Abflusses über die Südbauschwelle berücksichtigt.

Fünf der sechs Jahresablagerungen sind 14 cm mächtig, die sechste in der Mitte jedoch nur 9 cm. Die 14 cm stellen für diesen Zeitraum das normale Volumen des abgelagerten Schwebstoffgehaltes (inklusive Porenraum) beider Sayls dar und dokumentieren eine relativ konstante Menge feinkörniger Bestandteile in einer etwa 20 m hohen Wassersäule. (Eigentlich beträgt die im Stauraum verbleibende Überstauhöhe zweimal 11 m. Da aber nach dem Frühjahrssayl ein Trockenfallen ausgeschlossen wird, kann eine Restwasserhöhe in der Größenordnung 2 m angenommen werden.) Daraus ergibt sich ein gleichbleibendes Volumen der Ablagerungen von 7‰ für beide Sayls.

Da die Ablagerungen ein Porenvolumen von ca. 50% besitzen, ergibt sich ein gleichbleibendes reguläres Schwebstoffvolumen im Wasser von 3,5‰ bei zwei Sayls pro Jahr. Mit der Aufsedimentation wird aber gleichzeitig jedes Jahr die stehende Wasserschicht geringer, so daß die Sedimentationsrate von ca. 14 cm/a für die Stillwasserbereiche nur für die liegenden Horizonte gilt.

Schwierigkeiten bietet die Erklärung der lediglich 9 cm dicken Schicht. Hierbei könnte es sich um die Summierung zweier Niedrigwasserereignisse handeln. Diese Erklärung ist sehr unwahrscheinlich, weil selbst Niedrigwasser in der Lage sein müßte, zumindest den Stauraum aufzufüllen. Es ist wahrscheinlicher, daß es sich um die Ablagerungen nur eines einzigen Sayls handelt, also eine Regenzeit ausgefallen ist, was auch heute gelegentlich beobachtet wird.

In diesem Falle ist die 9 cm mächtige Ablagerung aus nur einer Wassersäule von 11 m Höhe hervorgegangen; das entspricht etwa 4,5 Volumenpromill ohne Porenraum. Der größere Schwebstoffanteil bei nur einem Sayl pro Jahr liegt an der relativen Anreicherung der Sedimente in dem nun einjährigen Oberflächenabfluß.

Der bislang ermittelte Schwebstoffgehalt in Volumenpromill ist aber auch der Anteil, der primär auf die Feldflächen transportiert wird und dort die Erhöhung verursacht. Somit ergibt sich bei zweimaliger Bewässerung im Jahr mit einer häufig beobachteten Überstauhöhe von 50 cm eine jährliche Sedimentationsrate von 7 mm. Erst wenn der Stauraum aufsedimentiert ist, besteht die Möglichkeit, daß auch

größere Komponenten auf die Bewässerungsareale gelangen und die Ablagerungsrate steigern. Zerstört wurde die Sequenz der Stauraumablagerungen jedoch durch eine unbekannte Anzahl von Dammbrüchen und die damit verbundene teilweise Ausräumung der Stauraumsedimente, was durch mehrere Diskordanzen belegt ist⁶⁴. Nach der Wiedererrichtung des Dammes wurde der jeweils entstandene Freiraum erneut von Sedimenten aufgefüllt, so daß die erhaltenen, beschriebenen Ablagerungen des Stauraumes nur einen kurzen Abschnitt der Geschichte des Dammes dokumentieren.

Abschätzung der jährlichen Sedimentation im Stauraum

Der Zyklus „Dambau – Retention – Sedimentation – Dammbruch – Ausräumung“ ist in seiner zeitlichen Wiederkehr stark von der jährlichen Sedimentmenge abhängig, die sich im Stauraum akkumuliert. Die beschriebenen Stauraumsedimente lassen eine jährliche Sedimentationsrate für die liegenden Ablagerungen der Stillwasserzone von ca. 14 cm/a erkennen. Die Annahme einer gleichbleibenden Sedimentation von 14 cm/a ergibt eine Zeitspanne von etwa 80 Jahren bis zur vollkommenen Aufsedimentation auf Schwellenniveau des Südbaus S 1.

Unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verhältnisse in diesen Bereichen des Stauraums dürfte wegen der jährlich geringfügig abnehmenden Wassersäule unterhalb der Bauwerksschwelle der Zeitabschnitt bis zur totalen Aufsedimentation weit über hundert Jahre und nicht „wenige Jahre bis Jahrzehnte“ betragen haben⁶⁵. Selbst die heute noch erhaltenen Sedimentreste über dem gestickten Dammrest dokumentieren einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten (Taf. 5b).

In den semiariden Gebieten mit nur episodischer bzw. periodischer Wasserführung der Flüsse erreicht die Schwebstofffracht ihre vergleichsweise höchsten Beträge. Werte bis zu 90 % sind durchaus bekannt. Demzufolge bildet die Geröll- oder Geschiebefracht, zu der auch Sand und Kies gehören, mengenmäßig den kleinsten Anteil der Gesamtfracht. Die grobkörnigsten Ablagerungen im heutigen Wadibett gehören zur Mittelsandfraktion. Die gesamte Geschiebefracht wurde zu Beginn jeder Bauwerksperiode im Stauraum abgelagert.

Im gleichen Maße, wie mit steigender Aufsedimentation das Stauraumvolumen und die Retentionswirkung abnahm, stiegen die zur Bewässerung zur Verfügung stehenden absoluten Wassermengen. Die Korngrößenzusammensetzung der Oasensedimente änderte sich, da immer mehr Geschiebefracht auf die Bewässerungsflächen gelangte.

Damit reduzierten sich sowohl die Stauraumablagerungen aus der Geschiebefracht als auch die aus der Schwebstofffracht. Dies wird durch die Oasensedimentzusammensetzungen, die ebenfalls einen langsam steigenden Sandgehalt über Zeiträume von mehreren hundert Jahren aufweisen, bestätigt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Stauraumauffüllung zur Betriebszeit weit weniger drastisch verlief als von BRUNNER⁶⁶ angenommen.

2.2 SEDIMENTATION IN DEN KANÄLEN

Das feinkörnige Material der Kanalsedimente ist gradiert geschichtet und horizontal gelagert. Lediglich eine vollständige Aufsedimentation des Stauraumes bewirkte wegen der ausbleibenden Retentionswirkung eine sandigere Zusammensetzung der Kanal- und letztlich der Oasensedimente. Die Sedimentation der überwiegend aus Grobschluff (0,063–0,02 mm) bestehenden Ablagerungen kann nur bei sehr geringen

64 Brunner a.O. (s. o. Anm. 1), S. 51.

66 Brunner a.O. (s. o. Anm. 1), S. 121.

65 Brunner a.O. (s. o. Anm. 1), S. 121.

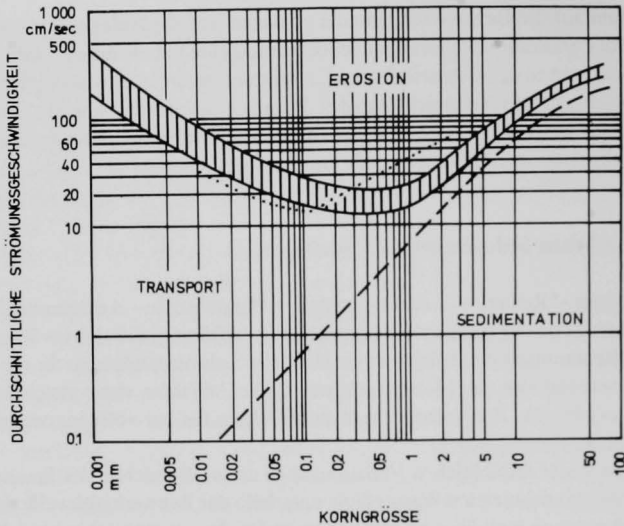


Abb. 18. Beziehung zwischen der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit in einem Gewässer und gleichkörnigen Sedimenten⁶⁷.

Fließgeschwindigkeiten oder aus einer stehenden Wassersäule nach Beendigung der Bewegung erfolgt sein.

Die durchschnittliche Jahresmächtigkeit der Kanalsedimentschicht (inklusive 50% Porenvolumen) beträgt 7 mm. Bei einem Schwebstofffrachtanteil von 0,35‰ entspricht eine Sedimentschicht von 7 mm dem Schwebstoffgehalt einer versickerten Wasserschicht von etwa 1 m. Daher kann in den Kanälen ein Wasserstand von etwa 1 m während des Betriebes vorausgesetzt werden.

An der Oberfläche der einzelnen Schichten kommt es durch die Anreicherung der feinen Bestandteile zur Ausbildung von tonig-schluffigen Krusten. Bei diesen Korngrößen (um 2 µm) besitzen die Teilchen eine so hohe Kohäsion, daß die mit geringen Fließgeschwindigkeiten herantransportierten Körner erst bei einer sehr viel größeren Geschwindigkeit von ca. 1 m/s wieder erodiert werden. Daher kann die Selbsterosion der Kanäle nahezu vollkommen ausgeschlossen werden (Abb. 18).

Einen weiteren Hinweis auf die geringen Fließgeschwindigkeiten in den Kanälen bieten die sehr selten beobachteten Kleinrippeln mit einem Talabstand ≤ 5 cm (Taf. 5c).

„... Strömungsrippeln entstehen lediglich in Sanden, die von Wasser überströmt werden. In schlackigen Sedimenten entstehen sie trotz gegenteiliger Behauptung nicht“⁶⁸.

Aufgrund eigener Beobachtungen im Hauptverteiler-System kann aber festgestellt werden, daß auch in fluviatilen Sedimenten, deren Korngrößen überwiegend < 63 µm sind, durchaus Kleinrippeln auftreten können. Damit wird die Aussage von TRUSHEIM⁶⁹ trotz abweichender Meinung anderer Autoren bestätigt.

67 Brinkmann a.O. (s. o. Anm. 63), S. 23.

68 H.-E. Reineck, Aktuogeologie klastischer Sedimente, 1984, 348 S.

69 F. Trusheim, Zur Bildungsgeschwindigkeit geschichteter Sedimente im Wattenmeer, besonders solcher mit schräger Parallelschichtung, in Senckenbergiana 11, S. 47–55, 1929.

Strömungs- geschwindigkeit cm/s	Md = 0,085		Md = 0,19		Md = 0,28	
	Klein- rippeln	Groß- rippeln	Klein- rippeln	Groß- rippeln	Klein- rippeln	Groß- rippeln
30	—	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	0,018	—
40	—	—	0,02	—	0,035	—
50	0,03	—	0,10	—	0,150	—
60	0,07	—	0,35	—	0,600	—
70	0,18	—	0,90	—	1,500	—
80	0,40	—	2,00	—	—	0,45
90	0,90	—	3,50	0,40	—	0,60
100	1,50	—	—	0,55	—	0,80
105	—	—	—	0,90	—	—
110	—	—	—	—	—	—
120	—	—	—	—	—	—

Tab. 1. Mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit von Groß- und Kleinrippeln in drei Sanden mit verschiedenen mittleren Korndurchmessern (MD)⁷⁰

Die Tabelle zeigt, daß bei größeren Korngrößen die kritische Verlagerungsgeschwindigkeit geringer ist als bei feineren Fraktionen. Bei den überwiegend schluffigen Kanalsedimenten in Marib ist demnach eine Fließgeschwindigkeit von mindestens 60 cm/s zur Rippelbildung nötig. Überwiegend lag die Fließgeschwindigkeit jedoch weit unter diesem Grenzwert, da der weitaus größere Anteil der Schichten horizontal abgelagert wurde. Daraus ist zu folgern, daß Fließgeschwindigkeiten von 60 cm/s im Kanalnetz nur sehr selten überschritten wurden und solche von über 100 cm/s (Beginn der Erosion) nicht erreicht wurden.

2.3 SEDIMENTE DER BEWÄSSERTEN FELDFLÄCHEN

Als Folge der anthropogen bedingten fluviatilen Ablagerungsprozesse der Schwebstoffe auf den Bewässerungsflächen und der damit verbundenen stetigen Erhöhung ragt die antike Oase von Märīb als heller, homogen erscheinender Sedimentblock aus der Ebene der Wüste Rub'al-Khālī auf (Taf. 6a).

Der Wert des Sediments für die Landwirtschaft ist unter anderem in großem Maße von der Porengrößenverteilung, der Korngrößenzusammensetzung und der daraus resultierenden Feldkapazität und der Wasserleitfähigkeit abhängig. Eine Gefahr liegt in dem Nährstoffverlust des Bodens und dem dadurch bedingten relativ starken Absinken der Erträge im Laufe weniger Vegetationsperioden. Diese Erschöpfung geht auf die Auswaschung und den Entzug der mineralischen Nährstoffe, die Zerstörung der optimalen Aggregatordnung durch Bearbeitung und die vermehrte Erosion zurück. Die Zufuhr von suspendiertem Bodenmaterial mit dem Bewässerungswasser beugte dem Nährstoffverlust vor.

Lediglich die Bodenbearbeitung und die Winderosion wirkten nachteilig. Aus diesem Grund war es sinnvoll, die Felder direkt nach der Bearbeitung zu bewässern.

⁷⁰ H. G. Dillo, Sandwanderungen in Tideflüssen, in Mitt. Franzius Inst. Grund-Wasserbau, TH Hannover, Bd. 17, 1960, S. 135–253.

Der Boden wird bei der Bewässerung einem Zyklus unterzogen, der zwischen extremer Aridität in der Trockenperiode und extremen Feuchtebedingungen während der Bewässerung schwankt. Daher verläuft z. B. die Verwitterung intensiver als sonst in ariden Böden und Zusammensetzung sowie Aktivität der Mikroflora werden stark variiert. So lassen sich je nach Ausgangslage eine Ab- oder Zunahme von Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt feststellen.

Grundsätzlich sind zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen in ariden bzw. semiariden Gebieten mehrere Arten der Wassergewinnung denkbar:

- Regenwasser auffangen und speichern
- Grundwasser durch genügend tiefe Brunnen nutzen
- direkte Bewässerung aus dem Wadi
- Bau eines Dammes und Nutzung des Wassers im Stauraum
- Kombination mehrerer oder aller dieser Möglichkeiten

Die nur gelegentlich auftretenden Regenfälle in der Umgebung von Mārib schließen eine gezielte und regelmäßige Bewässerung der Felder aus.

Die Position der Brunnen, die an Siedlungen gebunden sind, deutet auf eine primäre Versorgung der dort lebenden Menschen und Tiere mit Grundwasser hin. Zusätzlich konnten kleinere wichtige Areale um die Dörfer bewässert werden, eine großflächige Bewässerung der gesamten Oase ist aber wegen des viel zu großen Aufwandes und des begrenzten Grundwasservorkommens auszuschließen.

Die Felder selbst mußten, wenn das Saylwasser aufgebracht wurde, soweit vorbereitet sein, daß das Wasser leicht in den Boden eindringen konnte und dort festgehalten wurde. Die trockene, feste Erde mußte aufgelockert und die Kapillarwirkung des Bodens unterbrochen werden. Dadurch konnte viel Wasser im Erdreich gespeichert, die Verdunstung gemindert und eine Versalzung verhindert werden. Ein einmaliger Überstau mit 50–60 cm Wasser, wie er häufig in Anschnitten an Feldwällen zu beobachten ist, reichte aus, um eine Ernte der Wechselkulturen zu erzielen und durch Versickerung des Überschußwassers der Versalzung des Oberbodens vorzubeugen. Neben Wechselkulturen, die durch Pflugspuren gekennzeichnet sind, existierten auch Baumpflanzungen, wie Holzreste und umschließende Erdringe beweisen. Teilweise erfolgte auch eine Doppelnutzung der Felder, als Dauer- und Wechselkultur.

2.4 ZIELSETZUNG DER SEDIMENTUNTERSUCHUNGEN

Die Altersstellung der Sedimente, die Betriebsdauer der Oase und ihre Entwicklung sind weitgehend unbekannt. Daher wurde versucht, mit folgenden Laboruntersuchungen zur Klärung der Problematik beizutragen:

- Korngrößenanalyse

Da mit jedem Bewässerungsperiodenwechsel (vgl. Kap. 1.3) eine Dammerhöhung einherging, traten auch in den den auf Oasenflächen abgelagerten Sedimenten plötzliche Korngrößenzusammensetzungsänderungen auf. Mit Hilfe dieser zyklischen Änderungen lassen sich die aufeinander folgenden Betriebsperioden unterscheiden. Bei bekannter Mächtigkeit der während einer Periode akkumulierten Sedimente und bekannter jährlicher Sedimentationsrate läßt sich die jeweilige Betriebsdauer feststellen. Wenn sich die Zyklen zusätzlich bestimmten Betriebsperioden eindeutig zuordnen lassen, können verschiedene Profile korreliert werden und Aussagen über die Entwicklung der Oasenteile gemacht werden.

- Schwermineralanalyse

Veränderungen des Schwermineralspektrums müssen in allen zeitgleich abgelagerten Sedimenten auftreten. Mit dieser Untersuchung ist die Möglichkeit gegeben, verschiedene Oasenteile, z. B. Nord-

und Südoase, zu korrelieren und zugleich relative Altersangaben und Entwicklungsstadien zu erhalten.

– Pollenanalyse

Diese Untersuchung soll Angaben über die Art der angebauten Kulturen ermöglichen. Mit dem plötzlichen Auftreten einer neuen Kulturart sind zusätzliche Korrelationsmöglichkeiten von Flächen und relativen Betriebsperioden zu erwarten.

– C¹⁴-Analyse

Mit dieser Messung wird das absolute Alter der im Sediment enthaltenen organischen Substanz (Humus) ermittelt. Bei bekanntem Vertikalabstand zweier Bodenproben kann über die Altersdifferenz unmittelbar die jährliche Sedimentationsrate ermittelt werden. Die Altersdifferenz ist zugleich mit der Betriebsdauer identisch, vorausgesetzt, es gab während dieses Zeitraumes keine Zeiten ohne Sedimentablagerungen, d. h. ohne Bewässerung.

Zur Durchführung dieser Laboruntersuchungen war die Aufnahme von lückenlosen Profilen notwendig, wobei es Schwierigkeiten bereitete, Aufschlüsse zu finden, die nicht von einer sekundären Sedimenttapete verkleidet waren. Nur in diesen Fällen hatte die Korrasion Gelegenheit, die kleinsten Unterschiede in der Beschaffenheit des Sediments herauszuarbeiten. Lediglich an diesen Orten war es möglich, die Dicke der Sedimentablagerung einer Bewässerungsgabe zu ermitteln, was für die Festlegung der jährlichen Sedimentationsrate unerlässlich ist.

Auf der Südoase wurden vier Profile in einer Erosionsrinne quer durch die Oase beprobt. Eine solche günstige Aufschlußsituation, die gleichzeitig einen Schnitt durch die Südoase lieferte, war auf der Nordoase nicht gegeben. Hier wurden fünf Profile in Erosionsrinnen an den Wadirändern aufgenommen (Taf. 6b).

Durch die punktuelle Profilaufnahme in den Erosionsrinnen wurden zugleich Auskünfte über die Ausbildung und die aufgeschlossene Mächtigkeit am jeweiligen Standort erzielt. Die Probenentnahme erfolgte vom Liegenden zum Hangenden. Jeder Bank wurde in der Mitte eine Probe entnommen. Bei Mächtigkeiten über 80 cm wurden zwei, ab 120 cm Bankdicke drei Proben untersucht. An allen Proben der Nordoasenprofile wurden zusätzlich der Carbonat- und Humusgehalt sowie der pH-Wert bestimmt.

Die Analyse der Stechzylinderproben vom Damm, aus Kanälen und von den unterschiedlich genutzten Feldflächen (Dauerkulturen, Ackerbau) diente der Feststellung der

- K_r-Werte
- nutzbaren Feldkapazität
- Lagerungsdichte
- Salzgehalte.

2.5 RESULTATE DER VERSCHIEDENEN LABORUNTERSUCHUNGEN

2.5.1 Salzgehalt (Chloride)

Da Natriumchloride bereits in geringen Konzentrationen auf viele Kulturpflanzen toxisch wirken⁷¹, ist die Frage interessant, ob die landwirtschaftliche Nutzung der Oase eingeschränkt wurde.

Obwohl sich die mit dem Bewässerungswasser zugeführten gelösten Stoffe im Oberboden unter aridem Klima anreichern können, sind mit Silbernitrat (Ag NO₃) nachweisbare Chlorid-Gehalte in der Bodenlösung lediglich an der Basis der Oasenprofile P 1 und P 9 (zur Lage vgl. Taf. 6 b) ermittelt worden. Damit wird deutlich, daß die Bewässerungsgaben so reichlich dimensioniert waren, daß diese leicht löslichen Substanzen mit dem Sickerwasser bis hinunter zur Basis verlagert wurden. Eine Ertragsdepression

71 R. Kretzschmar, Kulturtechnisch-Bodenkundliches Praktikum. Inst. f. Wasserwirtschaft und Meliorations-

wesen d. Christian-Albrechts-Universität Kiel, 1984, 466 S.

durch erhöhte Chlorid-Gehalte trat somit auf den bearbeiteten Nutzflächen nicht auf. Die Salzanreicherung in der jeweiligen untersten Lage der beiden aufgeschlossenen Profile läßt die Vermutung zu, daß im unmittelbaren Untergrund eine wasserundurchlässige Schicht existiert, die die Wegführung der gelösten Salze verhinderte und gleichzeitig deren Akkumulation förderte.

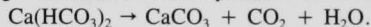
2.5.2 pH-Wert

Unter ariden Verhältnissen mit vorwiegend aufwärtsgerichteter Wasserbewegung wird der Oberboden nicht ausgewaschen. Die Bestandteile bleiben erhalten; es kann in extremen Fällen sogar zu einer Salzanreicherung an der Oberfläche kommen. Der Sorptionskomplex solcher Böden ist im allgemeinen vollständig mit Basen gesättigt und reagiert daher meist alkalisch. Die pH-Werte aller Proben liegen zwischen 7,5 und 8. Das deutet darauf hin, daß Na-Ionen an der Kationenaustauschkapazität beteiligt sind. Der neutrale bzw. leicht alkalische Charakter verleiht dem Sediment die Gefügestabilität und begünstigt den Nährstoffhaushalt. Obwohl eine Intensivnutzung des Bodens mit einer verstärkten Beanspruchung der Basenvorräte verbunden ist, werden durch die stetige Nachlieferung von Schwebstoffen mit basisch wirkenden Kationen im Bewässerungswasser immer die gleichen optimalen Bedingungen gehalten.

2.5.3 Kalkgehalt

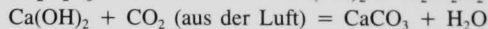
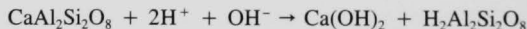
Die Carbonatbestimmung erfolgte gasvolumetrisch nach Scheibler. Böden mit einem Kalkgehalt von 2–10% werden als mäßig, von 10–20% als stark carbonathaltig bezeichnet⁷². Der Kalkanteil muß nicht primär mitsedimentiert werden. Er kann auch gelöst transportiert und chemisch gefällt werden, was charakteristisch für die Bodenentwicklung in ariden Gebieten ist.

Ursache dieser sekundären Carbonate ist die Absenkung des CO₂-Partialdruckes in der Bodenlösung und die gleichzeitige Ausfällung von Kalk aus dem System



In ariden Gebieten können auch CaCO₃-freie Gesteine durch Teilhydrolyse der Ca-Silikate eine Carbonatkruste erhalten.

z. B.



Das Calciumcarbonat schlägt sich an der Unterseite von Steinen und Kieseln nieder und verbindet die einzelnen Komponenten, so daß es letztendlich zur Bildung von verfestigten Sedimentgesteinen kommt. Ein Beispiel dafür ist der von den Sabäern gerne als Baustein genutzte schwach verfestigte, daher leicht bearbeitbare Lavagrus, der im nördlichen Teil im Untergrund der Oase vorhanden ist.

Allerdings ist mit einem primären Kalkanteil auf den Oasen zu rechnen, da im Einzugsbereich des Wādī Dana mesozoische Kalke anstehen. Die heutigen fluviatilen Sedimente im Wādī Dana bestehen zu 2,3% aus Carbonat; die im Wādī Ġufayna zu 9,6%. Dieser Unterschied ist auf den prozentual höheren Anteil mesozoischer Kalke im Einzugsgebiet zurückzuführen.

Das schwemmlößartige Sediment ist auf Grund seines Kalkgehaltes sehr fruchtbar. Der CaCO₃-Anteil der Bodenschichten schwankt zwischen 7,2 und 18,1%. Besonders auffällig ist das Zusammentreffen von hohem Sandanteil, Einzelkorngefüge und geringem Kalkgehalt. Das zeigt zum einen, daß der größte

⁷² AG Bodenkunde, Bodenkundliche Kartieranleitung, 3. Aufl., Hannover 1982.

Anteil der Carbonate entweder in den kleinen Kornfraktionen (die bei diesen Bedingungen nicht sedimentiert, sondern weitergeführt wurden) vorliegt oder aber gelöst transportiert und chemisch gefällt wurde. Zum anderen wird das ursprüngliche Einzelkorngefüge durch den Kalk verkittet und erwirbt das typische Kohärentgefüge.

Helle Kalkanreicherungen wurden auch um die Schichtgrenzen der einzelnen Bänke beobachtet, die von den Verschlammungskrusten gebildet werden (Taf. 7c). Diese aus tonigschluffigem Material bestehenden Krusten führen durch ihre verminderte Wasserdurchlässigkeit zu einem Anreicherungshorizont.

Die Tatsache, daß die Anreicherungen sowohl über als auch unter der Kruste auftreten, ist auf die Ausfällung aus Sickerwasser und/oder Kapillarwasser zurückzuführen. Welche Rolle in diesem Zusammenhang der beobachtete morgendliche Taufall besitzt, ist ungeklärt.

Im Laufe der Zeit werden in dieser Zone die Poren und Hohlräume mit CaCO_3 allmählich ausgefüllt, so daß der Horizont noch undurchlässiger wird und die vertikale Wasserbewegung noch mehr unterbunden. Neben Kalken können sich auch Gipse und Salze anreichern und ebenso das Eindringen und die Entwicklung von Wurzeln behindern.

Zu den Kalkkonzentrationen müssen auch die Wurzelröhrchen gezählt werden. Dabei handelt es sich um Hohlräume, die von abgestorbenen Halmen und Wurzeln hinterlassen werden. Die Wände der Röhrchen sind vielfach verfestigt und dadurch erhaltungsfähig (Osteokolle).

2.5.4 Humusgehalt

Unter Humus versteht man die Gesamtheit der abgestorbenen organischen Substanz im Boden. Der Humus beeinflusst wesentlich die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Bodens. Als Nährstoffträger für die Pflanzen und für die Bodenorganismen stellt er unter anderem auch ein Kriterium der Bodenfruchtbarkeit dar.

Der Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt des Bodens wird vom Humus in Gewichtsprozenten zwischen 1 und 10 günstig beeinflusst. Höhere oder niedrigere Konzentrationen bedingen nur in Ausnahmefällen gute Bodeneigenschaften.

Im Ackerboden sind die Bedingungen für die Humusbildung ungünstig, weil der Boden durch die Bearbeitung zu stark belüftet wird und daher die organische Substanz zu rasch abgebaut wird.

Die Temperaturgegensätze zwischen Tages- und Nachtmaxima wirken sich auf den ungeschützten Boden und den Humusgehalt ungünstig aus. So liegt zum einen das Maximum des Humusabbaus bei etwa $31-40^\circ\text{C}$ und zum anderen werden die Mikroorganismen des Bodens mit zunehmender Erwärmung und Trockenheit in ihrer Zusammensetzung und Individuenzahl beträchtlich verändert⁷³. Der Anteil der Pilze nimmt im Vergleich zu den Bakterien bis zu 90% zu.

Bakterien verkitten die Bodenpartikel mit ihren Stoffwechselprodukten und erleichtern die Krümelbildung des Oberbodens und deren Erhaltung. Daher zeigen bakterienarme Böden schneller Verschlammungskrusten, die langsamer Wasser aufnehmen und damit Oberflächenabfluß und Erosion begünstigen. Da Bakterien im Gegensatz zu Pilzen für den eigenen Stoffwechsel relativ wenig organische Substanz benötigen, den Stickstoffkreislauf beschleunigen und die übrigen von der Pflanze benötigten Nährstoffe bei der Humuszersetzung freigeben, werden nackte, bakterienarme Böden auch ohne Auswaschung schnell nährstoffarm, was die niedrigen Humusgehalte verständlich macht.

Nach dem Humusgehalt werden die Böden in verschiedene Gruppen eingeteilt. Gehalte von $\leq 1\%$ gelten als humusarme Mineralböden⁷⁴). Die untersuchten Schichten besitzen Humusgehalte zwischen 0,15% und 0,7%. Die Kohlenstoffbestimmung erfolgte photometrisch (Methode Lichterfelde). Der heutige

73 Kollmannsperger a.O. (s. o. Anm. 58).

74 AG Bodenkunde a.O. (s. o. Anm. 72).

geringe Humusanteil in den Bewässerungssedimenten läßt jedoch keine Rückschlüsse auf die antiken Bedingungen zu.

Die ehemaligen Baumstandorte weisen einen wesentlich höheren Humusgehalt auf. Die Sedimente in der Zone des früheren Stammes und die umgebende ringförmige Bewässerungsmulde weisen mit 1,8 bzw. 3,5% die höchsten Werte auf. In diesen Mengen beeinflußt der Humus die Stabilität des Bodens. Daraus erklärt sich die morphologische Heraushebung der Baumstandorte an der Oasenoberfläche. Bei diesen hohen Humusgehaltunterschieden genügt bereits die Winderosion, um diese sogenannten Erdringe bzw. die sich daraus entwickelnden größeren Erdringstotzen herauszumodellieren.

2.5.5 Lagerungsdichte

Die Überprüfung der Lagerungsdichte sollte die Frage klären, ob unterschiedliche landwirtschaftliche Nutzung der Feldflächen verschiedene Lagerungsdichten und somit unterschiedliche Oberflächenerhöhungen bewirken kann. Die Bestimmungen wurden an 100 cm³ Stechzylindern vorgenommen. Dabei wurde das Trockengewicht in Relation zum Volumen gesetzt (g/cm³).

In der Literatur⁷⁵ werden die Lagerungsdichten für Schluffböden mit 1,26–1,61 g/cm³ und für Tonböden mit 0,88–1,72 g/cm³ angegeben. Wie erwartet, liegen aufgrund der Korngrößenzusammensetzung die Ergebnisse der Proben in diesem Bereich. Dieses Volumengewicht beeinträchtigt die Entwicklung des Wurzelwachstums in der Regel nicht.

Lagerungsdichte der Feldflächen für

- Dauerkulturen 1,33 g/cm³
- Ackerbau 1,17 g/cm³

Der Unterschied zwischen der Lagerungsdichte auf den Feldflächen für Dauerkulturen und Ackerbau ist nutzungsbedingt, da die Ablagerungsverhältnisse die gleichen sind. Bei ruhigen Sedimentationsbedingungen in stehendem Wasser tritt eine recht gute Sortierung der Korngrößen von grob (unten) nach fein (oben) ein. Dies entspricht einer Lagerungsdichte, wie sie für Dauerkulturen typisch ist.

Erst die menschliche Bearbeitung der Ackerbaustandorte zerstörte die Schichtung. Durch Hacken und Pflügen trat eine Hohlraumvergrößerung von ca. 16% ein. Sie bewirkte aber auch bei gleicher Sedimentationsrate eine nach Nutzung unterschiedliche Erhöhung der Feldoberflächen. Diese Aussage gilt allerdings lediglich für die jeweilige Oberfläche oder Partien mit nur geringer Auflast. Bei steigendem Druck durch mächtigere Sedimente kann dieser Erhöhungsunterschied teilweise oder ganz rückgängig gemacht werden.

2.5.6 Nutzbare Feldkapazität

Die Kenntnis der nutzbaren Feldkapazität, die auch als Speicherfeuchte bezeichnet wird, ermöglicht Aussagen über die Wassermenge, die den Pflanzen nach einmaliger Bewässerung maximal zur Verfügung steht. Dieses Wasser wird in den Mittelporen, die einen Durchmesser zwischen 10–0,2 µm besitzen, gespeichert. Die Bestimmung der Porengrößen erfolgte an Stechzylindern durch Desorption bei 60 cm und 300 cm Wassersäule im Drucktopf sowie an gestörten Proben bei 15 bar in der Druckmembranapparat.

Bei einem Gesamtporenvolumen von ca. 50% weisen die Standorte Dauerkulturen und Ackerbau einen nahezu identischen Volumenanteil an pflanzenverfügbarem Wasser (nutzbare Feldkapazität) von 17,3% bei Dauerkulturen und 18,6% bei Ackerbau auf.

⁷⁵ Scheffer a.O. (s. o. Anm. 28).

Somit werden von den Bewässerungssedimenten auf der antiken Oase bei einer nutzbaren Speicherfeuchte von ca. 18 Volumen-% pro Dezimeter Bodentiefe 18 mm Bodenwasser gehalten, die den Pflanzen direkt zur Verfügung stehen. In einem zwei Meter tiefen Boden sind demnach, gleichbleibende Porenanteile vorausgesetzt, etwa 350–370 mm nutzbare Bodenfeuchte gespeichert. Diese Werte bestätigen die erwartete hohe Speicherkapazität und den günstigen Wasserhaushalt im vorliegenden Lockersediment und decken sich durchaus mit Untersuchungen EVENARI'S⁷⁶, der in Schwemmlöben der Negev-Wüste ein Wasserspeichervermögen von 16–17% festgestellt hat.

2.5.7 K_f -Wert

Die Eigenschaft des gesättigten Bodens, von Wasser durchströmt zu werden, wird durch den Durchlässigkeitskoeffizienten K_f gekennzeichnet, dessen Einheit cm/d ist. Die Durchlässigkeit eines Bodenhorizontes ist eine Funktion von Korngrößenverteilung und Bodengefüge. Sie hängt mehr von der Art der Porenverteilung als vom gesamten Porenvolumen ab. Sie wird durch die Zeit ausgedrückt, in der eine bestimmte Wassermenge durch einen definierten Bodenkörper nur der Schwerkraft folgend fließt. Um Aussagen über die Wasserdurchlässigkeit des Dammes und die Effektivität des Bewässerungssystems machen zu können, wurden an im Gelände genommenen Stechzylinderproben K_f -Wertbestimmungen durchgeführt. Bei der Bestimmung der K_f -Werte konnten während der kapillaren Wassersättigung an allen Proben starke Quellungen beobachtet werden. Diese Erscheinung, die durch den inneren Aufbau des Sediments bedingt ist, verändert sowohl das gesamte Porenvolumen als auch die Porenverteilung.

Bei Quellungen nimmt der Anteil an groben Sekundärporen ab, der an Mittelporen, vor allem aber der an Feinporen stark zu⁷⁷. Bei Trocknung bzw. Schrumpfung ist dieser Prozeß rückläufig. Dabei ist die Erstschrumpfung nach der Sedimentation von besonderer Bedeutung, weil eine vollständige Rückquellung selten ist⁷⁸, was eine Erhöhung der Wasserleitfähigkeit zur Folge hat.

Neben den Trockenrissen können auch Wurzelröhren und Tiergänge die Versickerung bzw. den Durchfluß extrem beschleunigen. Andererseits senkt die den Abschluß jeder Lage bildende tonig-schluffige Verschlammungskruste die Infiltrationsrate. Besonders um die Schichtfugen zwischen den Sedimentbänken wurden wiederholt stärker verdichtete Horizonte gefunden. Auf den nicht geneigten Feldflächen führte dieser Rückstau jedoch nicht zu Oberflächenabfluß, sondern nur zu einer Verzögerung der Infiltration.

Die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit (K_f) erfolgte mit dem Wasserpermeameter nach Hanus. Die Durchlässigkeitsstufen sind der AG BODENKUNDE⁷⁹ entnommen.

Untersucht wurden:

- 1a) antiker Damm (vgl. Taf. 5 b, Schicht unmittelbar unter der Stickung)
 $K_f = 4,95 \text{ cm/d} = \text{sehr gering durchlässig}$
- 1b) antiker Damm (darunterliegende Schicht 30 cm tiefer)
 $K_f = 7950 \text{ cm/d} = \text{sehr stark durchlässig}$
- 2) Kanal aus dem Hauptverteiler System
 $K_f = 160 \text{ cm/d} = \text{stark durchlässig}$
- 3) Hauptkanal aus dem Ġufayna-System
 $(KG 2) K_f = 7130 \text{ cm/d} = \text{sehr stark durchlässig}$

76 M. Evenari, Die Wüste soll wieder fruchtbar gemacht werden, in *Der Umbau in Wissenschaft und Technik*, H. 15 u. 16/1964. Frankfurt a. M., S. 463–466, S. 481–485.

77 Kollmannsperger a.O. (s. o. Anm. 98).

78 ders. a. O. (s. o. Anm. 58).

79 AG Bodenkunde a.O. (s. Anm. 72).

4) Feldfläche (Dauerkultur)

$K_f = 85-860 \text{ cm/d} = \text{gut} - \text{stark durchlässig}$

5) Feldfläche (Ackerbau)

$K_f = 65-150 \text{ cm/d} = \text{gut} - \text{stark durchlässig}$

Vergleicht man die Schicht 1 a ($D = 30 \text{ cm}$) unmittelbar unter der Dammschichtung mit der direkt darunterliegenden (1 b), so fällt der extreme Durchlässigkeitsunterschied auf, der bei ähnlicher Korngrößenzusammensetzung und ähnlichem Porenvolumen ($= 50\%$) mit einer größeren Lagerungsdichte und einer veränderten Porengrößenverteilung der obersten Dammschicht zusammenhängt.

Dort wird das Wasser in 80% der Poren entgegen der Schwerkraft gehalten. Aufgrund dieser Feststellung muß davon ausgegangen werden, daß die oberste Lage beim Dammbau gezielt (durch Stampfen oder Festklopfen) mechanisch verdichtet wurde, um den Wasserverlust durch Versickerung im Dammbereich so gering wie möglich zu halten.

Im Kanalnetz (Proben 2 und 3) mußte mit sehr großen Verlusten gerechnet werden, die zu Einschränkungen in der Effektivität des Bewässerungssystems führten.

Während der ermittelte Versickerungswert von 158 cm/d in dem zum Kanalsystem des Hauptverteilers gehörenden Kanal durchaus noch im Rahmen der im Löß üblichen Werte liegt, erscheinen die Durchlässigkeitswerte des Hauptkanals (KG 2) des Ğufayna-Systems doch sehr hoch, obwohl in der Literatur⁸⁰ für diese Körnungsklasse (Schluffböden) Werte bis $30\,000 \text{ cm/d}$ angegeben werden, sofern der Bodenraum mit Wurzelröhren und Tiergängen durchsetzt ist.

Zu bedenken ist ebenfalls, daß es wegen des Tongehaltes zu feinen Trockenrißbildungen kommt, die während der kapillaren Sättigung nicht mehr vollständig geschlossen werden, so daß dadurch die Durchlässigkeit um ein Vielfaches erhöht wird. Aber selbst bei einer Versickerung von 71 m/d , die in den Schluffablagerungen des Hauptkanals an der rezenten Oberfläche auftritt, ist nicht erwiesen, daß diese Wassermenge dem Bewässerungssystem im gesamten Kanalverlauf tatsächlich entzogen wurde. So sind z. B. stauende Horizonte im Liegenden denkbar, die die Versickerungsrate herabsetzen.

Die Meßwerte von den Feldflächen (Proben 4 und 5) streuen sehr stark, aber sowohl Feldflächen mit Dauerkulturen als auch Feldflächen mit Ackerbau sind gut bis stark durchlässig. Zusätzlich scheint sich eine Abhängigkeit von Vegetation und Bodenbearbeitung abzuzeichnen, wobei die ackerbaulich genutzten Standorte das Wasser langsamer aufnehmen. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang die leichtere Verschlemmbarkeit der anthropogen bearbeiteten lößähnlichen Bodenoberfläche durch die Zerstörung der Aggregatstruktur⁸¹ bei Wasserüberstau oder Starkregen, was eine Reduzierung des Anteils an dränenden Poren zur Folge hat.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß alle Proben, mit Ausnahme des Damms ein gutes bis sehr gutes Wasserleitvermögen besitzen. Durch diese geohydrologische Eigenschaft kann der Boden das aufgestaute Wasser in der Regel in weniger als einem Tag aufnehmen.

2.5.8 Radiokohlenstoff-Bestimmung (C^{14} -Methode)

Um die Altersstellung der Sedimente zu ermitteln, wurde die C^{14} -Methode angewendet. Sie ermöglicht die absolute Altersbestimmung von organischer Substanz, wie z. B. Holz und Holzkohle. Sie beruht auf der Tatsache, daß Lebewesen den natürlichen C^{14} -Gehalt der Atmosphäre im gleichen Verhältnis im Körper binden.

Erst nach dem Absterben wird der laufend zerfallende Anteil des radioaktiven C^{14} nicht mehr durch

80 Scheffer a.O. (s. o. Anm. 28, S. 173)

81 G. Morgenschweiß, Zum Bodenwasserhaushalt im

Lößleinzugsgebiet, Beiträge zur Hydrologie, 7, Kirchzarten 1980, S. 23-47.

eine Neuaufnahme ersetzt und der meßbare Zerfall beginnt. Da auch mineralische Böden organische Anteile (z. B. Humus) beinhalten, können auch von diesen die absoluten Datierungen ermittelt werden. Die Kenntnis des Vertikalabstandes zweier Bodenproben aus einem Profil ermöglicht bei bekannter Altersdifferenz die direkte Feststellung der jährlichen Sedimentationsrate. Dabei konnten eindeutig als Baumreste identifizierbare Stamm- und Wurzelstücke nicht berücksichtigt werden. Sie liefern zwar absolute Altersangaben, die Zuordnung zu der entsprechenden Oasenoberfläche ist jedoch unmöglich.

Die besonderen Bedingungen auf der Oase führen zu einer Sedimentbedeckung der auf der Oberfläche akkumulierten organischen Substanz nach einer Bewässerung und damit zu einer idealen räumlichen Trennung der verschiedenen Vegetationsperioden und des am Bewässerungsstandort entstandenen Humus. Dieser Idealfall kann jedoch durch die Tätigkeiten der Bodenfauna und des Menschen zerstört und die organische Substanz über mehrere Horizonte verteilt werden, so daß eine direkte Schichtzuordnung des Humus erschwert wird.

Diese Überlagerung der einzelnen Abschnitte verwischt die scharfen Übergänge, ist aber wegen der ständigen Aufsedimentation auf einen zeitlich und räumlich begrenzten Bereich beschränkt.

Eine viel gravierendere Beeinflussung der Meßergebnisse kann durch die Einschwemmung von Humus bei der Bewässerung entstehen. Beim syndementären Humus muß man zwei Ursprungsmöglichkeiten unterscheiden. Zum einen kann es sich um rezenten Humus aus anderen Teilen des Einzugsgebietes handeln, der aber die Datierung nicht verändern würde. Zum anderen jedoch sind möglicherweise auch organische Substanzen eingetragen worden, die schon im Erosionsgebiet fossil waren. Diese Vermischung von älterem und jüngerem Humus würde ein Mischalter ergeben, das in erster Linie von der Menge und dem Alter der eingeschwemmten Teile abhängig ist.

Durch die C^{14} -Bestimmung zweier Proben mit größtmöglichem Vertikalabstand sollte eine für das gesamte Profil gültige durchschnittliche jährliche Sedimentationsrate ermittelt werden. Durchgeführt wurden die Bestimmungen am Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Köln.

Für die Untersuchung wurden die Profile P 4 (Nordoase) und P 9 (Südoase) ausgewählt, weil sie die größten Sedimentmächtigkeiten besitzen (vgl. Taf. 6 b).

	P 4	P 9
Höhe der hangenden Probe	1190,00 m ü. M.	1186,2 m ü. M.
Höhe der liegenden Probe	1182,45 m ü. M.	1178,6 m ü. M.
Höhendifferenz h	7,55 m	7,6 m
C^{14} -Alter der hangenden Probe	4960 $\pm$ 30 y BP	5530 $\pm$ 150 y BP
C^{14} -Alter der liegenden Probe	5730 $\pm$ 80 y B.P.	12150 $\pm$ 100 x BP
Altersdifferenz t	770 y	6620 y
jährl. Sedimentationsrate h/t	0,98 cm/y	0,12 cm/y

Tab. 2. Ermittlung der jährlichen Sedimentationsrate mit Hilfe der C^{14} -Datierung

Die Ergebnisse der C^{14} -Bestimmung und die daraus resultierenden jährlichen Sedimentationsraten können wegen ihrer großen Unterschiedlichkeit nicht zur Klärung der Problematik herangezogen werden.

So ist z. B. die nachweislich stratigraphisch sehr späte und hohe Probe am Top des Profils 4 (Ende der Periode II) aufgrund ihres C^{14} -Alters auf 3000 v. Chr. zu datieren. Das widerspricht den bauhistori-

schen Aufnahmen, die das früheste bekannte Bewässerungsbauwerk S 6 im Wādī Dana an das Ende des 3. Jahrtausends v. Chr. stellen⁸².

Der Beginn der Bewässerung der westlichen Südoase wäre mit Hilfe des Humusgehaltes der Probe von der Basis des Profils 9 ins 11. Jahrtausend v. Chr. zu legen. Zu dieser Zeit waren die technischen Möglichkeiten jedoch mit Sicherheit noch nicht so weit fortgeschritten, daß ein Bauwerk in der Dimension von S 6, das mit den liegenden Ablagerungen höhenmäßig korrespondiert, errichtet werden konnte. Da alle C¹⁴-Bestimmungen ein viel zu hohes Alter für die betreffenden Proben angeben, ist nicht abtrennbarer eingeschwemmter fossiler Humus zu erwarten, der das tatsächliche Alter überdeckt.

Die große Schwankungsbreite der verschiedenen Mischalter deutet auf unterschiedliche Mengen fossilen Humus hin, die wahrscheinlich auf verschiedene Niederschlagsgebiete zurückzuführen sind. Daraus kann man ableiten, daß es Zeiten im Yemen gab, in denen ein feuchtes Klima eine ausgedehntere und dichtere Vegetation erlaubte. Die während dieses Klimas sedimentierten fossilen organischen Substanzen wurden durch Niederschlagsereignisse umgelagert und fluvial auf die Oasenflächen transportiert. In der deutlichen Altersabnahme der jüngeren Mischalter kommt zum Ausdruck, daß im Laufe der Zeit die Menge des fossilen Humus im Einzugsgebiet abnahm.

Die mit Hilfe dieser Datierungsmethode ermittelten jährlichen Sedimentationsraten sind ebenfalls von den oben genannten Faktoren abhängig und daher zu ungenau, um bei der Berechnung der Oasenbetriebsdauer aus Sedimentmächtigkeit und jährlicher Sedimentationsrate Verwendung zu finden.

Glücklicherweise lagen Resultate von BRUNNER⁸³ vor, der einige eingeschwemmte Holzkohlehorizonte untersuchte. Er ermittelte den Zeitpunkt des Absterbens der Pflanzen, nicht jedoch den Zeitpunkt des Verbrennens oder den der Umlagerung. Daher können, falls es sich um Leseholz gehandelt hat, Diskrepanzen von mehreren hundert Jahren auftreten. In jedem Fall ist das C¹⁴-Alter der Probe älter bzw. gleich alt wie die Entstehung des fluvialen Horizontes.

Weil die Holzkohlehorizonte in den Profilen nur einmal auftreten und daher nur ein Alter festzustellen ist, mußte Brunner zur Ermittlung der jährlichen Sedimentationsrate das Bewässerungsende am Standort und die seit dieser Zeit erfolgte Erosion abschätzen. Nach heutigen Erkenntnissen ist der Zeitpunkt der Aufgabe bestimmter Oasenflächen ebenso unterschiedlich wie die Erosion an verschiedenen Standorten, so daß möglicherweise Fehler auftreten, die nur bei genauer Prüfung der Örtlichkeit auf ein Minimum reduziert werden können.

Unter diesem Gesichtspunkt sollen an dieser Stelle die von BRUNNER⁸⁴ ermittelten Sedimentationsraten für Nord- und Südoase mit eigenen Werten verglichen werden.

	Eingabedaten BRUNNER	eigene Werte
Lage der Probe	1188,5 m ü. M.	1188,5 m ü. M.
Geländeoberfläche	1192,0 m ü. M.	1192,0 m ü. M.
Erosion	1,5 m	max. 0,6 m
Sedimentmächtigkeit	5,0 m	4,1 m
C ¹⁴ -Alter der Probe (UZ-527)	2205 ± 110 y BP	2205 ± 110 y BP
Fundort vgl. Abb. 33		
Aufgabe der Bewässerung	1350 y BP	1680 y BP (vgl. Abb. 40)
Zeitdifferenz	850 y	525 y
Sedimentationsrate	5 m/850 y = 0,6 cm/y	4,1 m/525 y = 0,78 cm/y

Tab. 3. Sedimentationsrate Südoase

	Eingabedaten BRUNNER	eigene Werte
Lage der Probe	1185,7 m ü. M.	1185,7 m ü. M.
Geländeoberfläche	1191,5 m ü. M.	1191,5 m ü. M.
Erosion	2,5 m	0,5 m
Sedimentmächtigkeit	8,3 m	6,3 m
C ¹⁴ -Alter der Probe (UZ-245)	2080 ± 70 y BP	2080 ± 70 y BP
Fundort vgl. Abb. 13		
Aufgabe der Bewässerung	1350 y BP	1375 y BP
Zeitdifferenz	730 y	705 y
Sedimentationsrate	8,3 m/730 y = 1,1 cm/y	6,3 m/705 y = 0,89 cm/y

Tab. 4. Sedimentationsrate Nordoase

Die Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse der Sedimentationsraten von Süd- und Nordoase liegt in den veränderten Angaben der Sedimentmächtigkeit und der Erosion. Überdies wird das jeweilige Ende der Bewässerung modifiziert (vgl. Abb. 40). Die Änderung der Erosionswerte auf der Südoase und Nordoase wird in den Abb. 33 und Abb. 13 deutlich. Der Fundort der Probe UZ-527 ist in Abb. 33 im Bereich der oberen Terrasse anzusiedeln und Probe UZ-245 liegt im nördlichen Gebiet der Terrasse um den Punkt 14 (Abb. 13). Beide Erosionswerte stellen maximale Angaben dar.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß sich die Sedimentationsraten für Nord- und Südoase, die mit Hilfe der C¹⁴-Untersuchungen von BRUNNER⁸⁵ und den überarbeiteten Eingangsdaten ermittelt wurden, durchaus entsprechen. Diese Übereinstimmung deutet darauf hin, daß das postulierte vorzeitige Aufgabedatum der Südoase (etwa 300 Jahre früher), richtig zu sein scheint. Im Rahmen der Genauigkeit der Radiokohlenstoff-Bestimmung liegt die Sedimentationsrate für das obere Drittel der Ablagerungen in einem Bereich um 8 mm/y. Diese Größenordnung ist aufgrund des stark gestiegenen Sandgehaltes in den hangenden Ablagerungen beider Oasenteile und der damit verbundenen größeren Sedimentfracht des Bewässerungswassers sehr wahrscheinlich.

2.5.9 Pollenanalyse

Der Versuch, gestützt auf eine systematische Pollenanalyse Aussagen über die auf der Oase während des Betriebszeitraums angebauten Kulturpflanzen zu machen, stellte sich als nicht durchführbar heraus. Der sehr schlechte Erhaltungszustand der Pollen aus einigen Stichproben machte eine genauere Identifikation unmöglich.

Die weitgehende Zersetzung von Pollen tritt bei Umweltbedingungen auf, die in der Literatur beschrieben werden. HAVINGA⁸⁶ stellte die stärkste Korrosion im oxidierenden Millieu bei pH-Werten um den Neutralpunkt fest.

82 Herberg a.O. (s. o. Anm. 62).

83 Brunner a.O. (s. o. Anm. 1), S. 65, S. 71.

84 Brunner a.O. (s. o. Anm. 1).

85 Brunner a.O. (s. o. Anm. 1).

86 A. J. Havinga, A Palynological Investigation of Soil Profiles Development in Cover Sand, in Medes. Landbouwhogeschool Wageningen, 1963, S. 61.

Mikrobielle Tätigkeiten verstärken die Korrosion der Pollen bei pH-Werten von 5,5 bis 7,5 im Boden⁸⁷, dem Bereich der größten biologischen Aktivität. Da diese Bedingungen für die gesamte Ablagerungssequenz gelten, konnten auch in den nicht untersuchten Schichten keine besser erhaltenen Pollen erwartet werden, so daß auf weiterführende Analysen verzichtet wurde.

2.5.10 Schwermineralanalyse

Schwerminerale sind überwiegend in der Sandfraktion angereichert. Das Oasensediment stellt ein günstiges Ausgangsmaterial dar, weil durch einfaches Absieben die Sandfraktion angereichert werden kann. Die Weiterbehandlung erfolgte mit HCL, um so Carbonatverkrustungen zu zerstören und ein sauberes Schwermineralspektrum zu erhalten. 20 g der Sandfraktion wurden jeweils für eine Schwermineralanalyse verwendet. Die Trennung von Leicht- und Schwermineralfraktion geschah im Scheidetrichter mit der Standardflüssigkeit Bromoform (2,89 g/cm³).

Mit Hilfe der Schwermineralstratigraphie können Aussagen über die Gesteine im Einzugsgebiet des Wādī Dana und deren Erosionsgrad gemacht werden.

Treten durch Veränderungen des Einzugsgebietes oder durch Erosion neu angeschnittener Schichten Abweichungen im Schwermineralspektrum auf, müssen diese Abweichungen in den Sedimenten der Nord- und Südoase zeitgleich erscheinen, so daß die Schwermineralanalyse die Korrelation der beiden Oasenhälften ermöglicht.

Für die Bearbeitung wurden die Profile 4 (Nordoase) und 9 (Südoase) ausgewählt. Beide liegen am Steilrand der Oase zum Wādī Dana und stellen die mächtigsten lückenlosen Profile dar, was für die Stratigraphie von großer Bedeutung ist.

Aufgrund ihres hohen spezifischen Gewichts besitzt die Sedimentation der Schwerminerale eine größere Abhängigkeit von den Ablagerungsbedingungen als die der übrigen Sandfraktion. Ihre Gesamtmenge in den einzelnen Bänken der Oasenflächen läßt daher Rückschlüsse auf das jeweilige Retentionsvermögen des Stauraums zu. So werden bei aufsedimentiertem Stauraum am Ende einer Betriebsperiode deutlich mehr Schwerminerale auf die Bewässerungsflächen transportiert als zu Beginn.

Die Schwermineralanteile der verschiedenen Sedimentbänke (vgl. GLOSSAR) in den Profilen 4 und 9 sind in den Abbildungen 19 und 20 als Gewichtsprozent der absoluten Sedimenteinsaat dargestellt. Die Abbildungen zeigen starke zyklische Schwankungen des Gesamtgehalts in den beiden Profilen. Daher erscheint eine Unterteilung der Sedimentprofile in verschiedene Bewässerungsperioden mit Hilfe der absoluten Schwermineralmengen möglich. Bauliche Veränderungen am Damm und den Auslaßbauwerken können ausgeführt worden sein, nachdem auf der Nordoase im Profil 4 die Bänke 1, 3, 6, 9 und 15 und auf der Südoase im Profil 9 die Bänke 1, 4, 7 und 11 abgelagert worden waren. Da sich diese Ergebnisse mit den Resultaten der Korngrößenanalyse der entsprechenden Profile decken (Kap. 2.6), wird eine gemeinsame Betrachtung dieser für die Entwicklung der Oase aussagekräftigen Resultate später durchgeführt.

Die abgetrennten Schwerminerale wurden auch einer röntgenographischen Untersuchung unterzogen. Die röntgenographische Mineralsprache besitzt den Vorteil, daß alle Minerale, also auch die opaken, erkannt werden können. Dagegen muß als Nachteil gewertet werden, daß Arten, deren Anteil geringer als 10% im Spektrum ist, kaum bestimmbar sind. Daher sollten nur, wie im vorliegenden Fall, artenarme Schwermineralassoziationen zur Untersuchung herangezogen werden. Das Spektrum besteht überwiegend aus Biotit, Chlorit, Muskovit und einer Hornblende, die als Riebeckit identifiziert wurde.

87 B. E. Berglund, Guideline for Investigation of Terrestrial Soil Profiles. Palaeohydrological Changes in the Temperate Zone in the last 15 000 Years. Subproject B.

Lake and Mine Environments, in Intern. Geol. Correl. Progr. Proj., 158, Lund., 1979.

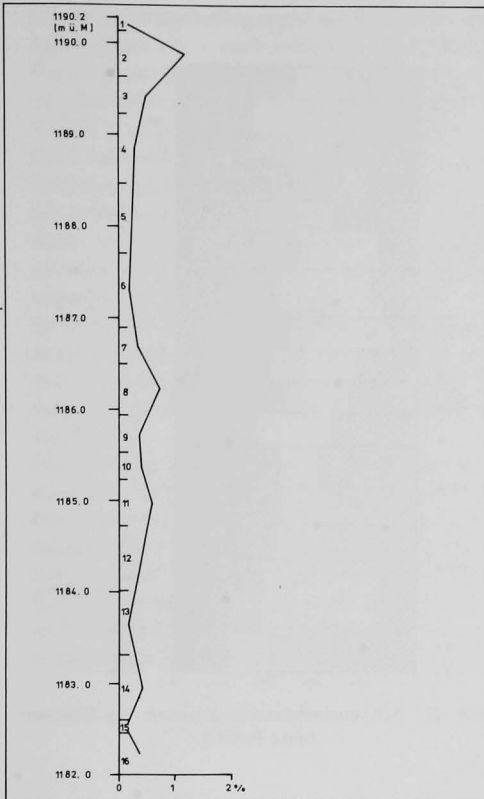


Abb. 19. Schwermineralgewichtszprozent der Sedimentbänke Profil 4.

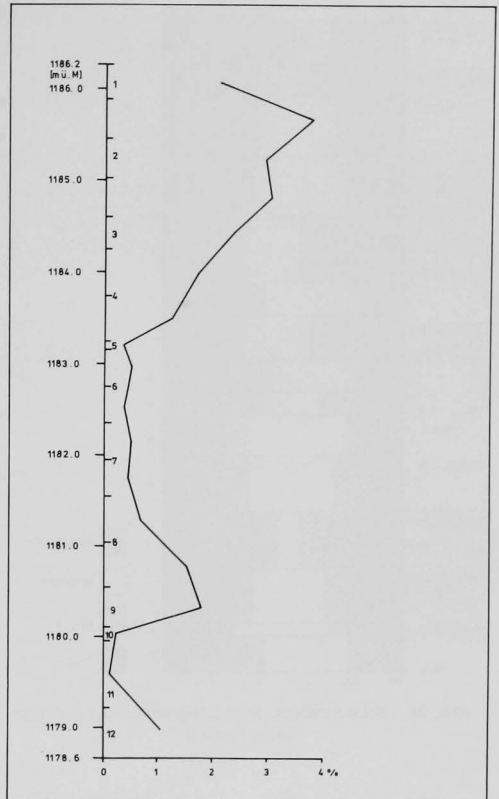


Abb. 20. Schwermineralgewichtszprozent der Sedimentbänke Profil 9.

Da der Anteil einer Mineralperiode am Gemenge proportional zur Intensität seiner Röntgenreflexe ist, lassen sich die Gehalte auch halbquantitativ abschätzen.

Die mit dieser Methode festgestellten Mengenverhältnisse der Schwerminerale in den Sedimenten der Profile 4 und 9 sind in den Abbildungen 21 und 22 festgehalten.

Aus den Darstellungen wird deutlich, daß relative Schwankungen des einzelnen Mineralanteils festzustellen sind, jedoch lassen sich die zyklischen Prozesse, die bei der Bewässerung der Oase stattgefunden haben, mit Hilfe der Schwermineralanalyse nicht nachweisen. Veränderungen des Spektrums, wie z. B. das Auftreten anderer Minerale, sind in den Profilen nicht zu erkennen. Das Material scheint recht einheitlich, so daß Änderungen des bekannten Einzugsgebietes des Wādī Dana oder Änderungen des Erosionsgrades während der aus geologischer Sicht relativ kurzen Betriebszeit der Oase ausgeschlossen werden können.

Das Liefergebiet der Schwerminerale bilden das Kristallin bzw. die kristallinen Schiefer des Einzugsgebietes. Während die Glimmer Biotit und Muskovit sowohl aus magmatischen als auch metamorphen Gesteinen stammen können, sind für den Chlorit epimetamorphe Gesteine und für den Riebeckit ausschließlich saure bis intermediäre Magmatite als Lieferanten möglich. Obwohl die Minerale mit

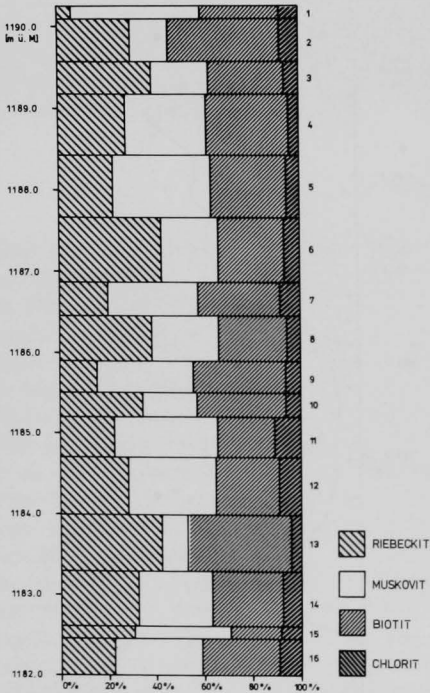


Abb. 21. Schwermineralsummendiagramm der Sedimentbänke Profil 4.

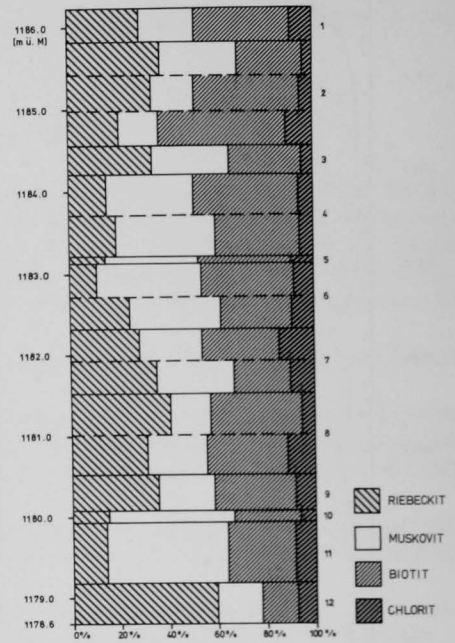


Abb. 22. Schwermineralsummendiagramm der Sedimentbänke Profil 9.

Ausnahme des Muskovits mäßig stabil bis instabil bei Umweltbedingungen sind, zeigt besonders die Häufigkeit der instabilen Hornblende in allen Proben die fehlende bzw. geringe Verwitterung im ariden Klimabereich. Ein weiteres Anzeichen für Verwitterung wäre die Abnahme der absoluten Schwermineralmenge zum Hangenden⁸⁸. Die untersuchten Profile geben jedoch keine Hinweise auf Verwitterungsprozesse.

Es ist festzustellen, daß das geringe Alter der Ablagerungen nicht ausreicht, um den primären Mineralbestand durch die Verwitterung zu modifizieren. Eine Korrelation der Betriebsperioden zwischen Nord- und Süd-Oase ist somit unmöglich.

2.6 BESCHREIBUNG UND KORNGRÖSSENANALYSEN DER NORD- UND SÜDOASENPROFILE

Die Bestimmung der Korngrößen wurde nach der Carbonatzerstörung, der Dispergierung mit Na-Pyrophosphat und der Ultraschallbehandlung als kombinierte Sieb-Pipettanalyse durchgeführt. Mit der Korngrößenanalyse und der Beschreibung der verschiedenen Oasenprofile konnte ein rhythmischer Wechsel

⁸⁸ W. Boenick, Schwermineralanalyse, 1983, S. 158.

der Ablagerungsbedingungen nachgewiesen werden. Gleichzeitig war es möglich, die Ablagerungsbedingungen mit – auch zeitlich – definierten Bewässerungsperioden zu korrelieren.

Die Lage der Profile innerhalb der Oase ist in Taf. 6b dargestellt. Die zusammenfassende Korrelation und Darstellung der im folgenden aufgeführten Einzelergebnisse ist für die Profile der Südoase im Kapitel 3.1 und für die Profile der Nordoase im Kapitel 3.2 dargestellt worden.

Die Untersuchungen wurden durchgeführt, weil die Korngrößen der auf den Bewässerungsflächen der Oase abgelagerten Sedimente vom Retentionsvermögen des Stauraums abhängig waren. Nur bei vollständig aufsedimentiertem Stauraum wurden infolge der höheren Fließgeschwindigkeiten gröbere Kornfraktionen auf die Oasen transportiert. Umgekehrt wurden nach Bauwerks- bzw. Dammerhöhungen zuerst die feineren Schwebstoffe auf der Feldfläche abgelagert, während der gröbere Sandanteil noch im neu entstandenen Stauraum sedimentierte.

So kann z. B. die Korngrößenverteilung zur Trennung der zentralen Nordoasensedimente (Hauptvertersystem) von denen, die mit dem Bauwerk im Wādī Ġufayna in Zusammenhang stehen, benutzt werden. Auch die Sedimente der Südoase (Profile 6–9) lassen sich von denen der Nordoase (Profile 1–5) aufgrund der Korngrößenanalyse unterscheiden; generell sind die Südoasenablagerungen gröber und sandreicher.

Die Körnung beeinflusst die physikalischen Bodeneigenschaften, wie Wasserdurchlässigkeit, Wasserkapazität, Hygroskopizität und den Luft- und Wärmehaushalt.

Das Korngemisch der Oasen-Sedimente reicht von der Tonfraktion bis zur Mittelsandfraktion. Auffällig ist das Fehlen des Grobsandes in nahezu sämtlichen Proben. Das Hauptmaximum der Korngröße liegt hauptsächlich in der Schlufffraktion und innerhalb dieser im Grobschluffbereich. Den Aussagen der Korngrößenanalysen vorangestellt werden die jeweiligen Profilbeschreibungen, wodurch ebenfalls Veränderungen der Ablagerungsbedingungen und der landwirtschaftlichen Nutzung erkannt werden können sowie Zeiten der Nichtbewässerung bzw. der Aufgabe festzustellen sind.

2.6.1 Profil 1

Lage: Nordoase (s. Taf. 6 b); 1183,46 m ü. M., eben

Nutzung: ehemalige Oase; Wüste

Substrat: Oasensediment, (Abb. 23)

Bewässerungs- periode	Bank	
I	1	0–3 cm, rötlich-gelblich, Schluff (U), Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 15%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	2	3–11 cm, rötlich-gelblich, toniger Schluff (tU), Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 18%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	3	11–49 cm, rötlich-gelblich, tU, Humusgehalt 0,6%, Kalkgehalt 13%, Kohärentgefüge mit Bodenfragmenten, homogener Aufbau
I	4	49–59 cm, rötlich-gelblich, tU, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 15%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	5	59–61 cm, rötlich-gelblich, sandiger Schluff (sU), Humusgehalt 0,2%, Kalkgehalt 11%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau
I	6	61–63 cm, rötlich-gelblich, tU, Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 16%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau

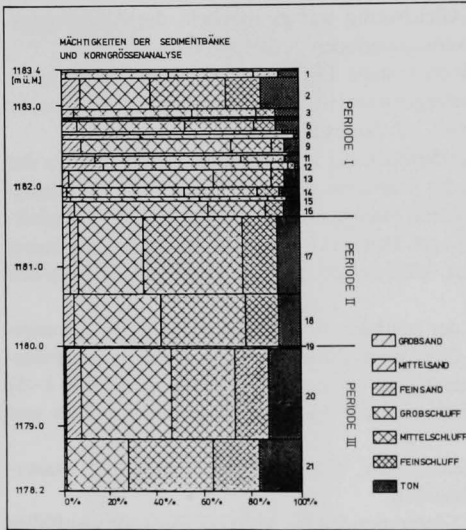


Abb. 23. Korngrößenverteilung in Profil 1.

I	7	63–76 cm, rötlich-gelblich, tU, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 16%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	8	76–80 cm, rötlich-gelblich, sU, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 11%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau
I	9	80–86 cm, rötlich-gelblich, sU, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau
I	10	86–103 cm, rötlich-gelblich, U, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 14%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	11	103–106 cm, rötlich-gelblich, tU, Humusgehalt 0,6%, Kalkgehalt 15%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau
I	12	106–114 cm, rötlich-gelblich, U, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 14%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	13	114–123 cm, rötlich-gelblich, U, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	14	123–145 cm, rötlich-gelblich, U, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 15%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	15	145–156 cm, rötlich-gelblich, tU, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 17%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	16	156–162 cm, rötlich-gelblich, U, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 18%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau
I	17	162–181 cm, rötlich-gelblich, U, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 16%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
II	18	181–276 cm, oberflächlich rötlich-gelblich, darunter gelblich, tU, Humusgehalt 0,5%, Kalkgehalt 16%, Kohärentgefüge, homogen, wenige Wurzelröhrchen
II	19	276–341 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,6%, Kalkgehalt 15%, Kohärentgefüge, homogen, wenige Wurzelröhrchen
III	20	341–343,5 cm, gelblich, schluffiger Sand (uS), Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau

III	21	343,5–456,5 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,6%, Kalkgehalt 14%, Kohärentgefüge, homogen, wenige Wurzelröhrchen
III	22	456,5–521,5 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,6%, Kalkgehalt 16%, Kohärentgefüge, homogen, wenige Wurzelröhrchen.

Bei der Betrachtung des Profils 1 fällt auf, daß die hangenden Sedimentbänke 1–17 im wesentlichen geringer mächtig sind als die liegenden Bänke 18–22. Zudem herrscht im Hangenden der primäre Aufbau der einzelnen Sedimentbänke vor. Sie lassen sich in 2–5 mm mächtige Schichten mit Einzelkorngefüge unterteilen. Jede Schicht entspricht einer Bewässerung und wird von einer tonig-schluffigen Kruste abgeschlossen. Die liegenden Bänke sind dagegen homogenisiert und besitzen ein Kohärentgefüge. Lediglich Bank 20, die eine Mächtigkeit von 2,5 cm aufweist, läßt sich in acht Schichten unterteilen. Alle Ablagerungen des Profils weisen feine Osteokolle auf. Ebenfalls deutlich sichtbar ändert sich die Farbe der Sedimente. Während die hangenden Ablagerungen eine rötliche Farbe besitzen, überwiegt an der Basis ein gelblicher Farbton (Taf. 7a).

Entscheidend für die Farbe der Sedimentschichten ist die Farbe des Ausgangsmaterials. Farbunterschiede können so durch Veränderungen im oder des gesamten Liefergebietes hervorgerufen werden. Die im Profil 1 der Nordoase am Wādī Ġufayna zwischen Bank 18 und 19 zu erkennende Farbänderung ins Rötliche ist auf eine plötzlich stark gestiegene Beimengung von rotem Gesteinsmaterial zurückzuführen. Da solche Bestandteile in den Sedimenten des Wādī Dana bisher nicht beobachtet wurden, muß ein anderes Liefergebiet für die Färbung verantwortlich sein. In Frage kommt nur das Wādī Ġufayna, dessen Untergrund an vielen Stellen aus Basalten und deren rötlichem Grus gebildet wird.

Durch die Verlagerung der Hochwasserentlastung des Nordbaus N 1 nach Norden ins Wādī Ġufayna (vgl. Kap. 3.4) während der Bewässerungsperiode I wurden die Nordoasenablagerungen bis zur Basis erodiert und die Möglichkeit geschaffen, den Lavagrus aufzuarbeiten und weiter zu transportieren, so daß zu den normalen Schwebstoffen auch noch der vulkanische Anteil hinzutritt, der die rötliche Farbe verursacht. Erst nach der Errichtung des Bewässerungsbauwerkes „al-Mabnā“ im Wādī Ġufayna war es möglich, die zuvor aufgegebenen Teile der Nordoase erneut zu bewässern, so daß die rötlichen und gering mächtigen Bänke 1–17 diesem Bauwerk zugeordnet werden. Die Farbänderung ist aber nicht, wie die zuvor beschriebenen Differenzierungen zwischen dem Hauptverteiler – und dem „al-Mabnā“-System an der Grenze zwischen den Bänken 17 und 18 bei 1181,58 m ü. M. (Periodenwechsel von II zu I) sondern durch oberflächliche Verlagerung schon eine Bank tiefer gewandert. Unter dieser Tapete präsentiert sich jedoch noch der ursprüngliche gelbliche Farbton.

Die Konkordanz der hangenden Ablagerungen beweist, daß Erosion zwischen der Aufgabe der landwirtschaftlichen Nutzung dieses Gebietes und der erneuten Bewässerung von „al-Mabnā“ aus keine große Rolle gespielt hat, obwohl ein größerer Zeitraum verstrichen war (vgl. Kap. 3.2).

Nur durch Laboruntersuchungen sind die anderen Unterscheidungsmerkmale zwischen den liegenden Ablagerungen des Hauptverteiler-Systems und dem „al-Mabnā“-System festzustellen. Der Humusgehalt der untersten Bänke ist z. B. mit rund 0,6% etwa doppelt so hoch wie in den darüberliegenden. Aufgrund ihrer Homogenität, die keinerlei Schichtung erkennen läßt, müssen die Bänke zwischen der Basis und 1181,58 m ü. M. über Jahre hinweg bearbeitet, gepflügt und landwirtschaftlich genutzt worden sein. Die hangenden Ablagerungen dagegen werden entsprechend ihrer Genese eher zu den kanalähnlichen Sedimenten der überfluteten Zwischenräume gezählt, deren schichtiger Aufbau sichtbar ist.

Sie wurden nie bestellt und ihr geringer Humusgehalt von 0,3% ist auf Einschwemmungen oder Bewuchs von niedrigen Pflanzen zurückzuführen.

Eine Ausnahme bildet lediglich die Bank 3 (0,6% Humus), die mit 38 cm mächtigste Bank der hangenden Ablagerungen. Die Bodenfragmente im ungeschichteten Sediment deuten auf eine ackerbauliche Bewirtschaftung am Top des Profils hin.

Korngrößenanalyse

Während die hangenden Bänke 1 bis 17 dem Bauwerk „al-Mabnā“ und damit der Bewässerungsperiode I zuzuordnen sind, repräsentieren die liegenden Bänke 18 bis 21 die älteren zentralen Nordoassensedimente des Hauptverteilersystems. Die Grenze zwischen Bank 20 und Bank 19 bei 1179,97 m ü. M. trennt in diesem Profil 160 cm Ablagerungen der Periode II von mindestens 180 cm Sedimenten der Periode III. In den Bänken 22 bis 20 ist eine starke kontinuierliche Zunahme der Feinsand- und Grobschluffanteile auf Kosten der gleichzeitig abnehmenden Mittelschluff-, Feinschluff- und Tongehalte zu beobachten.

Mit der Bank 20 endete ein Zyklus der Auf- und Zusiedimentation des Stauraums und der damit verbundenen Fließgeschwindigkeitszunahme in den Kanälen. Das wiederum ermöglichte den Transport größerer Korngrößen auf die Felder. Durch bauliche Veränderungen am Damm und an den Auslässen wurde der Wasserspiegel erhöht und die Sedimentation der Sande wieder in den Stauraum zurückverlegt, so daß mit Bank 19 die erneute Ablagerung feinkörniger Sedimente begann.

Eine weitere Modifikation der Bauwerke ist in Profil 1 eindeutig nach Bank 18 (1181,58 m ü. M.) zu beobachten.

Die älteren Ablagerungen sind generell feinkörniger als die mit dem Bauwerk „al-Mabnā“ zusammenhängenden wesentlich dünneren Bänke mit stark variierenden Korngrößenzusammensetzungen, die keine Kontinuität erkennen lassen und damit einen relativ schnellen Wechsel der Ablagerungsbedingungen andeuten. Jedoch gibt es auch in höheren Niveaus Bänke, deren Zusammensetzungen denen der liegenden Sedimente entsprechen. Eine Erklärung dafür könnte sein, daß der Abfluß des mit feineren Schwebstoffen belasteten Wassers, der aus dem Stauraum über die Hochwasserentlastung ins Wādī Ġufayna geleitet wurde, stark variierte. Daher konnte das Dargebot aus dem eigentlich recht kleinen Einzugsgebiet des Wādī Ġufayna mit seiner deutlich größeren Sedimentzusammensetzung im Mischwasser der beiden zusammengeleiteten Systeme dominieren. Lediglich bei besonderen Hochwasserereignissen wurde der Abfluß aus dem Wādī Dana so groß, daß der Einfluß des Wādī Ġufayna unterdrückt wurde und die Ablagerungen wieder die Korngrößenzusammensetzung des Hauptverteilersystems annahmen.

	pH	Humus- gehalt %	CaCO ₃ 3%	Gr. Sand 600– 6000µm	Mi. Sand 200– 600µm	Fe. Sand 60– 200µm	Gr. Sch. 20– 60µm	Mi. Sch. 6– 20µm	Fe. Sch. 2– 6µm	Ton < 2µm
Wādī Dana	7,85	0,08	2,28	0,45	43,08	46,60	7,60	0,40	0,05	1,85
Wādī Ġufayna	7,78	0,12	9,64	16,00	53,80	23,0	3,90	0,55	0,50	2,25

Tab. 5. Unterschiedliche Zusammensetzung der heutigen Ablagerungen im Wādī Dana und im Wādī Ġufayna

2.6.2 Profil 2

Lage: Nordoase (s. Taf. 6 b); 1185,21 m ü. M., eben

Nutzung: ehemalige Oase; Wüste

Substrat: Oasensediment, (Abb. 24)

Bewässerungs- periode	Bank	
I	1	0–55 cm, gelblich-weiß, Schluff (U), Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 13%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	2	55–78 cm, gelblich-weiß, U, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 18%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	3	78–91 cm, gelblich-weiß, U, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 15%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	4	91–131 cm, gelblich-weiß, sandiger Schluff (sU), Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 12%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	5	131–161 cm, gelblich-weiß, toniger Schluff (tU), Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 17%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	6	161–171 cm, gelblich-weiß, tU, Humusgehalt 0,6%, Kalkgehalt 15%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	7	171–186 cm, gelblich-weiß, sU, Humusgehalt 0,2%, Kalkgehalt 8%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	8	186–206 cm, gelblich-weiß, tU, Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 18%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
I	9	206–246 cm, gelblich-weiß, U, Humusgehalt 0,6%, Kalkgehalt 16%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
II	10	246–389 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 12%, Kohärentgefüge, homogen, Wurzelröhrchen
II	11	389–489 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,2%, Kalkgehalt 9%, Kohärentgefüge, homogen, Wurzelröhrchen
II	12	489–529 cm, gelblich, U, Kohärentgefüge, homogen, Wurzelröhrchen
III	13	529–624 cm, gelblich, sU, Kohärentgefüge, homogen, Wurzelröhrchen
III	14	624–708 cm, gelblich, U, Kohärentgefüge, homogen, Wurzelröhrchen
III	15	708–716 cm, gelblich, U, Einzelkorngefüge
III	16	716–876 cm, gelblich, sU, Kohärentgefüge, homogen, Wurzelröhrchen.

Die jüngeren Ablagerungen der Bänke 1–9 besaßen andere Sedimentationsbedingungen als die älteren Sedimente der Bänke 10 bis 16. So nimmt die Bankdicke und der Verfestigungsgrad deutlich ab. Daher lassen sie auch einen geschichteten inneren Aufbau erkennen, der nur von vereinzelt feinen Wurzelröhren durchbrochen wird. Zum anderen wird die Farbe der Ablagerungen deutlich heller und gelegentlich treten Trockenrisse auf, so daß diese Sedimente als Kanalablagerungen der letzten Bewässerungsperiode I zugerechnet werden.

Die Bänke 10 bis 14 sind überwiegend sehr kompakt und homogenisiert, mit Bodenfragmenten aus geschichteten Ablagerungskrusten versehen und von Wurzelröhren bis 3 cm Ø durchsetzt, die mit gröberem, von oben nachgesickertem Lockermaterial oder Bodenfragmenten gefüllt sind. Gelegentlich ist die ursprüngliche Feinschichtung auch in diesen Lagen noch bemerkbar. So sind z. B. in 70 cm Höhe von

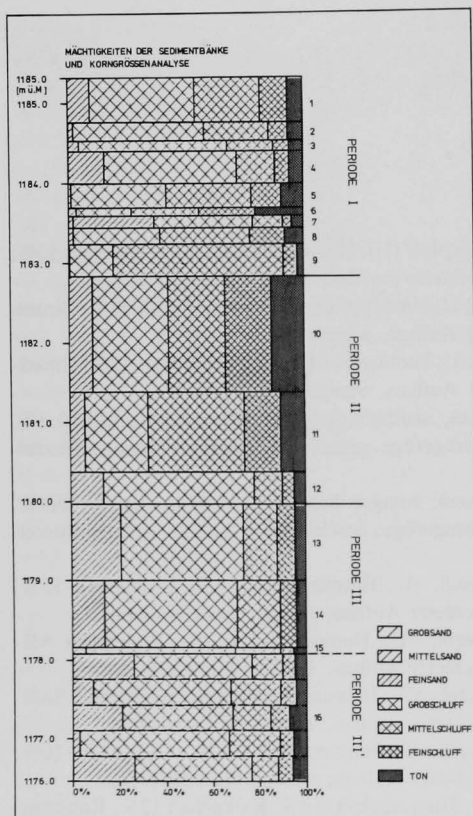


Abb. 24. Korngrößenverteilung in Profil 2.

Bank 13 sieben geschichtete Lagen (Mächtigkeit je 0,3 cm) sichtbar. Bank 15 wird von 8 cm unverfestigten und ungestörten Ablagerungen gebildet. An der Basis des Profils ist Bank 16 (160 cm) abgeschlossen, die homogenisiert, d. h. ohne erkennbaren Schichtaufbau ist. Gelegentlich als Bodenfragmente auftretende schichtige Krusten lassen dennoch die primären Ablagerungsbedingungen erkennen. Wurzelröhren mit Füllungen, im Durchmesser 1–2 cm, sind relativ häufig vorhanden und dokumentieren neben den Bodenfragmenten die landwirtschaftliche Nutzung.

Korngrößenanalyse

Die Korngrößenverteilung läßt vier Abschnitte in Profil 2 erkennen.

Der jüngste Zyklus wird von den Sedimentbänken 1 bis 9 gebildet, die neben variierenden Korngrößenzusammensetzungen auch ein anderes optisches Erscheinungsbild aufweisen. Aufgrund ihrer Position an der Geländeoberfläche werden die Ablagerungen in die letzte Bewässerungsperiode I gestellt und als Sedimente eines Kanals gedeutet, der auf der oberen Terrasse dem Randkanal zustrebt, der das Hauptverteilersystem gegen das Ğufayna-System abgrenzt.

Die Verteilung der Korngrößen in der Kanaltrasse ist während der letzten Bewässerungsperiode wesentlich differenzierter. So sind die Abstände zwischen einer Abfolge, beginnend mit überwiegend kleinen und endend mit größeren Korngrößen sehr viel geringer geworden (ca. 80 cm).

Die Ursache dafür dürfte in den dem Kanal vorgelagerten Bauwerken liegen, deren Schwellenerhöhung-

gen nachweisbar diese Größenordnung besitzen. Der Kanal ist damit einer untergeordneten Kategorie zuzuordnen. Seine Aufgabe war es vermutlich, daß überschüssige Bewässerungswasser an der großen Nord-Süd verlaufenden Terrassenstufe, die den zentralen Teil der Nordoase begrenzt, zu sammeln und es zum Rand des Hauptverteilungssystems zu leiten, wo es dann an geeigneter Stelle in das tiefere Gufayna-System übergeleitet wurde.

Die nächst ältere Sequenz der Bewässerungsperiode II wird von den Bänken 10 bis 12 aufgebaut. An der Basis (Bank 12) ist der Sandgehalt zwar geringer als in der liegenden Bank 13, jedoch wird das Minimum erst in Bank 11 erreicht. Da der Grobschluffanteil in der Bank 12 sogar noch ansteigt, kann davon ausgegangen werden, daß die Dammerhöhung und die damit verbundene Bauwerksveränderung nicht durch die Grenze zwischen 13 und 12 dokumentiert wird. Eher ist es möglich, daß diese Änderung im unteren Teil der Bank 12 liegt und durch die Homogenisierung bei der Bearbeitung und die einmalige Beprobung aus der Mitte der 40 cm mächtigen Lage eine Mischprobe untersucht wurde, die die eigentliche Periodengrenze nicht mehr genau erkennen läßt. Die beiden auflagernden Bänke 11 und 10 sind wieder den Erwartungen entsprechend ausgebildet, d. h. der Grobkornanteil nimmt kontinuierlich bis zur nächsten einschneidenden Veränderung der Korngrößenverteilung zu. Das ist mit Dammerhöhung und Inbetriebnahme neuer Auslaßbauwerke identisch.

2.6.3 Profil 3

Lage: Nordoase (s. Taf. 6 b); 1192,30 m ü. M., eben

Nutzung: ehemalige Oase; Wüste

Substrat: Oasensediment, Oasenbasis, (Abb. 25)

Bewässerungs- periode	Bank	
I	1	0–80 cm, gelblich, toniger Schluff (tU), Humusgehalt 0,5 %, Kalkgehalt 9 %, Krümelgefüge, feine Wurzelröhrchen
I	2	80–100 cm, gelblich, schluffiger Lehm, (uL), Humusgehalt 0,6 %, Kalkgehalt 10 %, Krümelgefüge, feine Wurzelröhrchen
II	3	100–260 cm, lehmiger Sand (lS), Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 6 %, Krümelgefüge, feine Wurzelröhrchen
II	4	260–350 cm, gelblich, sandig-schluffiger Lehm (suL), Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 8 %, Krümelgefüge, Wurzelröhrchen
II	5	350–405 cm, gelblich, suL, Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 9 %, Krümelgefüge, feine Wurzelröhrchen
II	6	405–420 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 11 %, Krümelgefüge, feine Wurzelröhrchen
II	7	420–440 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 13 %, Krümelgefüge, feine Wurzelröhrchen
III		440–525, Aufschlußlücke
III	8	525–550 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 9 %, Krümelgefüge, feine Wurzelröhrchen
III	9	550–625 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 10 %, Krümelgefüge, feine Wurzelröhrchen
III	10	625–716 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,4 %, Kalkgehalt 11 %, Krümelgefüge, feine Wurzelröhrchen

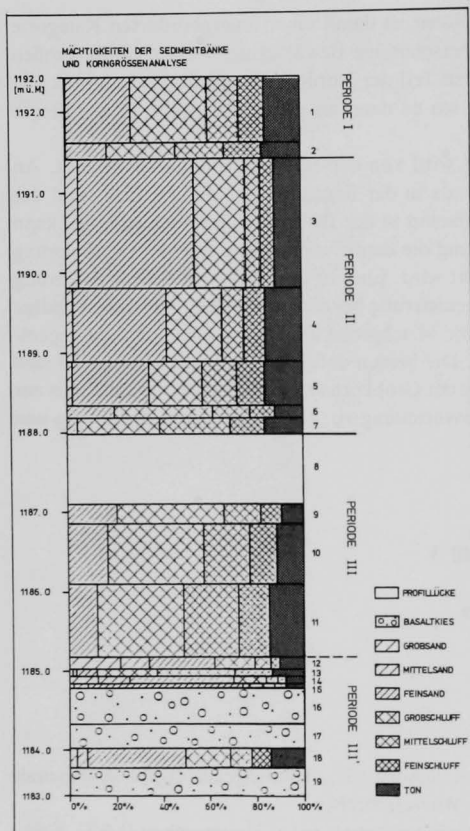


Abb. 25. Korngrößenverteilung in Profil 3.

III'	11	716–731 cm, gelblich, IS, Humusgehalt 0,2%, Kalkgehalt 5%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, geringer Basaltkiesanteil
III'	12	731–740 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 11%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, Basaltkiesanteil
III'	13	740–749 cm, gelblich, IS, Humusgehalt 0,1%, Kalkgehalt 5%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, starker Basaltkiesanteil
III'	14	749–755 cm, gelblich, IS, Humusgehalt 0,1%, Kalkgehalt 4%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, sehr starker Basaltkiesanteil
III'	15	755–800 cm, dunkel, Basaltkies, schräg geschichtet
III'	16	800–830 cm, dunkel, Basaltkies, schräg geschichtet
III'	17	830–855 cm, gelblich, IS, Humusgehalt 0,2%, Kalkgehalt 13%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, sehr starker Basaltkiesanteil
III'	18	855–890 cm, dunkel, Basaltkies, schräg geschichtet, über Kalkkruste.

Profil 3 befindet sich in einer Erosionsrinne, in der die Oase bis unterhalb der Basis angeschnitten ist. Durch eine Aufschlußlücke ist es zweigeteilt. Der untere Teil ist in Taf. 7 b dargestellt. Etwa 100 m in Richtung auf das Zentrum der Oase ist dann der obere Teil der Gesamtabfolge abgelagert worden.

Das geschah zu einem Zeitpunkt, als die untere Terrasse schon aus den bewässerten Oasenflächen ausgegliedert war.

Die Oasensedimente der Bänke 1 bis 10 sind relativ einheitlich ausgebildet. Sie besitzen durchweg krümelige Aggregate und sind daher auch nicht so stark homogenisiert und verfestigt. Dennoch ist die primäre Lagerung weitgehend zerstört, und nur gelegentlich ist die Feinschichtung noch zu erkennen. Überall sind feine Wurzelröhrchen sichtbar. Vereinzelt besitzen sie aber auch einen Durchmesser im Bereich von 1–3 cm und sind nachträglich mit Sediment gefüllt.

Im unteren Teil des Profils (Bank 11 bis Bank 18) ist eine Wechsellagerung von grobem, teilweise schrägschichtetem Lavagrus mit feinkörnigem horizontalen Oasensediment aufgeschlossen, wobei jedoch die Oasementlagen bis zur Bank 11 ebenfalls Lavakomponenten enthalten. Erst im Hangenden sind alle Bänke geröllfrei.

Während die feinkörnigen, hellen Ablagerungen unzweifelhaft aus dem Wādī Dana stammen, ist dies für die Basaltgerölle auszuschließen. Da sie jedoch auf Grund der Schrägschichtung eindeutig fluvial sedimentiert wurden und wegen ihrer Kantigkeit weite Transportwege ausscheiden, müssen sie aus der unmittelbaren Umgebung umgelagert worden sein.

Basalte und ihr Verwitterungsschutt sind am Ġibāl Daš al-Ḥašab und Wādī Ġufayna aufwärts anzutreffen. Hier liegen sie jedoch auf einer Bewässerungsfläche in unmittelbarer Nähe eines Feldwalles, der die Oase nach Norden gegen das Lavagebiet des Ġibāl Daš al-Ḥašab begrenzte. Aus diesem Grunde konnten sie nur von dem Bewässerungswasser abgelagert werden.

Dafür stand allerdings nur das Dargebot aus dem Wādī Ġufayna zur Verfügung, das in der gleichen Periode III zum Schutz des neu errichteten Hauptkanals abgelenkt werden mußte (vgl. Kap. 3.4). Nach der Überleitung über den Basaltstrom gelangte es in die Oasenbegrenzung und war zur zusätzlichen Bewässerung gedacht. In regenreichen Jahren konnte es allerdings auch den Basaltschutt aufarbeiten, umlagern und so die erfolgreiche Neuerschließung zunichte machen.

Profil 3 zeigt, daß die Sabäer durchaus in der Lage waren, diesen Planungsfehler abzustellen (ab Bank 12 nimmt der Anteil an Basaltkies ab und von Bank 10 an fehlt er völlig). Das konnte jedoch nicht direkt erfolgen. Immerhin wurden an der Basis des aufgeschlossenen Profils (1183,40 m – 1184,80 m) 1,40 m mögliche Nutzfläche verschenkt, bevor eine gezielte Bewirtschaftung begann.

Die genaue Art der Kontrolle des Wādī Ġufayna-Abflusses ist nicht bekannt. Als wahrscheinlichste Lösung ist aber ein Randkanal außerhalb der Feldflächen anzusehen oder die Einleitung und der Einstau in der Oase vorgelagerte Becken.

Die liegenden Sedimente der Bewässerungsperiode III werden von den Bänken 13 bis 15 gebildet, in denen der Sandgehalt wie erwartet stetig zunimmt. Die Ablagerungen sind also in Zusammenhang mit einem geschlossenen Damm zu sehen.

Der tiefste und älteste Zyklus wird von der liegenden Bank 16 (160 cm) gebildet, die ziemlich homogen erscheint. Aufgrund der Mächtigkeit wurden hier fünf Proben im Abstand von jeweils 30 cm entnommen. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, daß diese Bank keineswegs so gleichförmig ausgebildet ist, wie es den Anschein hat. Die Ton- und Feinschluffgehalte sind nahezu konstant, während die Feinsand- und die dominierenden restlichen Schluffanteile variieren. Diese Wechsel auf geringer Distanz, die trotz der Homogenisierung durch Bearbeitung noch vorhanden sind, deuten auf eine unetige Sedimentzufuhr hin.

Korngößenanalyse

Profil 3 stellt ein eindrucksvolles Beispiel für den stetigen Anstieg des grobkörnigen Sedimentanteils während einer Betriebsperiode und seinen plötzlichen Abfall nach einer Bauwerksveränderung im Dammbereich dar. Diese Sedimente lassen sich am besten anhand der Korngößenverteilung differenzieren. Generell läßt sich vorausschicken, daß die gesamte Abfolge trotz randlicher Lage einen extrem hohen Sandgehalt besitzt, der sonst nur auf der Südoase anzutreffen ist.

Nachdem in der Frühperiode eine kontinuierliche Entwicklung dieses Oasenteils durch die oftmalige Verschüttung der schon abgelagerten dünnen Oasensedimente durch die Lavabrocken unmöglich war, setzt nach Beendigung des Einflusses des Wādi Gufayna ab Bank 10 der normale Sedimentationszyklus mit relativ feinkörnigen Sedimenten ein. Zum Top der Bewässerungsterrasse hin nehmen die Feinsandanteile gleichmäßig zu. Das Maximum der Sandfraktion muß in der Aufschlußlücke gelegen haben, d. h. in einer Bank die im unteren Teil des Profils schon erodiert und in der hangenden Fortsetzung noch nicht angeschnitten ist. Bank 7 jedenfalls deutet aufgrund der extremen Feinkörnigkeit auf den Beginn einer neuen Bewässerungsperiode nach Erhöhung des Dammes und der Auslaßbauwerke hin. Auch hierauf folgt wieder eine beständige Zunahme der Sandanteile bis zur Bank 3 einschließlich.

Darüber ist eine deutlich sprunghafte Abnahme des Sandgehalts bei gleichzeitiger Zunahme der Ton- und feinen Schlufffraktionen festzustellen. Aufgrund der Höhenlage dieser letzten noch erhaltenen 1 m mächtigen Abfolge muß sie mit der Bauwerksperiode I korreliert werden. Das bedeutet, daß in diesem randlichen Teil der Oase der jüngste Bewässerungsabschnitt bei 1191,41 m ü. M. begann. Darunter folgen 3,40 m die der Periode II zuzuordnen sind.

Sedimente, die mit Bau N 4 (Schwelle 1181,60 m ü. M.) in Verbindung stehen sind wegen der Höhe der frühesten Ablagerungen in diesem Bereich der Feldflächen nicht zu erwarten, so daß die untere Terrasse die Periode III repräsentiert.

Allerdings ist eine weitere Unterteilung dieser Abfolge möglich. Die abrupte Sedimentänderung bei 1185,12 m ü. M. läßt die Vermutung zu, daß bauliche Veränderungen am Überleitungssystem des Wādi Gufayna stattgefunden haben. Dies könnte seine Ursache in dem Umbau des Ableitungsbauwerks N 3' zu N 3 gehabt haben, der aufgrund der Oasensituation (vgl. Kap. 3.4) erfolgt sein muß.

Nach dem Ende der Bewässerungsperiode III gehörte der untere Teil des Profils nicht mehr zu den Nutzflächen. In den 2400 Jahren seit der Aufgabe dieses Gebietes sind maximal 100 cm Boden abgetragen worden. Zusätzlich wird deutlich, daß die Oase während der Betriebsperiode III in diesem Gebiet die größte Flächenausdehnung besaß. In den Perioden danach wurde nicht mehr das mögliche Gesamtgebiet bewirtschaftet, sondern auf einem kleineren Areal die Anlage von Bewässerungsterrassen bevorzugt.

2.6.4 Profil 4

Lage: Nordoase (s. Taf. 6 b); 1190,17 m ü. M., eben

Nutzung: ehemalige Oase; Wüste

Substrat: Oasensediment, (Abb. 26)

Bewässerungs- periode	Bank	
I	1	0–15 cm, gelblich, toniger Schluff (tU), Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 12%, Krümelgefüge, viele Wurzelröhrchen
II	2	15–65 cm, gelblich, sandig-schluffiger Lehm (suL), Humusgehalt 0,5%, Kalkgehalt 9%, Krümelgefüge, Wurzelröhrchen
II	3	65–105 cm, gelblich, Schluff (U), Humusgehalt 0,2%, Kalkgehalt 10%, Einzelkorngefüge, geschichteter Aufbau, wenige Wurzelröhrchen
II	4	105–180 cm, gelblich, schluffiger Lehm, (uL), Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 13%, Kohärentgefüge, homogen, Wurzelröhren
II	5	180–255 cm, gelblich, uL, Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 13%, Kohärentgefüge, homogen, Wurzelröhren
II	6	255–335 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 14%, Kohärentgefüge, homogen, feine Wurzelröhrchen

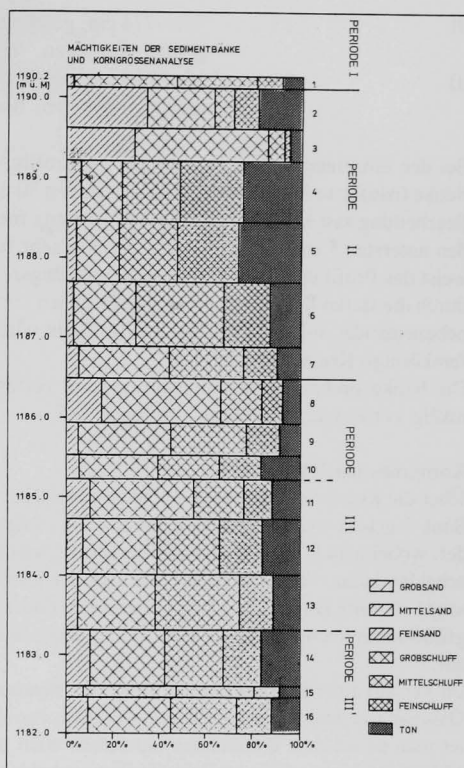


Abb. 26. Korngrößenverteilung in Profil 4.

II	7	335–375 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,4 %, Kalkgehalt 12 %, Kohärentgefüge, homogen, Bodenfragmente, Wurzelröhren
III	8	375–430 cm, gelblich, sandiger Schluff (sU), Humusgehalt 0,2 %, Kalkgehalt 10 %, Kohärentgefüge, homogen, stark durchwurzelt
III	9	430–470 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 13 %, Kohärentgefüge, homogen, die liegenden 5 cm sind feingeschichtet mit Einzelkorngefüge
III	10	470–500 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,4 %, Kalkgehalt 11 %, Kohärentgefüge, homogen, stark durchwurzelt
III	11	500–550 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 12 %, Kohärentgefüge, homogen, stark durchwurzelt
III	12	550–620 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,4 %, Kalkgehalt 13 %, Kohärentgefüge, homogen, stark durchwurzelt, die liegenden 2 cm sind feingeschichtet mit Einzelkorngefüge
III	13	620–690 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 14 %, Kohärentgefüge, homogen, stark durchwurzelt
III	14	690–760 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 12 %, Kohärentgefüge, homogen, Wurzelkanäle

III	15	760–774 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 11%, Kohärentgefüge, homogen, feine Wurzelröhrchen
III	16	774–820 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3%, Kalkgehalt 12%, Kohärentgefüge, homogen, Bodenfragmente, Wurzelröhren.

Bei den einzelnen Sedimentschichten des Profils 4 handelt es sich um homogene 15–80 cm mächtige Bänke (häufigste Mächtigkeit jedoch zwischen 70 und 80 cm), die als Folge der ständigen anthropogenen Bearbeitung fast keine weitere Differenzierung mehr zulassen. Lediglich die Bänke 9 und 12 weisen in den untersten 5 cm Feinschichtung und nur sehr feine Osteokolle auf. Die Homogenisierung der Bänke weist das Profil über den gesamten Ablagerungszeitraum als Standort von saisonalen Kulturen aus, was durch die starke Durchwurzelung unterstrichen wird. Dabei treten große (2–3 cm) und kleine Osteokolle nebeneinander auf. Der Abschluß jeder Bank wird durch eine helle kalkreiche, ton- und schluffreiche, feinkörnige Kruste gebildet.

Die Bänke sind alle sehr kompakt und stark verfestigt. Lediglich am Top treten in den Bänken 1 und 2 mäßig verfestigte, krümelige Aggregate auf.

Korngrößenanalyse

Über die Korngrößenanalyse ist eine gewisse Differenzierung des Profils möglich. Alle Bänke (lediglich Bank 2 gehört wegen des hohen Sandanteils zu den sandig-schluffigen Lehmen) sind schluffig ausgebildet, wobei man je nach Ton- und Sandgehalt zwischen Schluff, lehmigem Schluff und Schlufflehm unterscheiden kann. Vorherrschend ist jedoch der Grob- und Mittelschluffanteil. Der Sandgehalt (nur Feinsand) ist sehr gering (ca. 10%). Dennoch sind zwei deutliche sprunghafte Änderungen in der Korngrößenzusammensetzung der Abfolge zu beobachten. Diese treten nach Bank 2 und wieder nach Bank 8 auf.

Im Verlauf einer Bewässerungsperiode sedimentiert der Stauraum auf und die Korngrößenverteilung der Oasenablagerungen verschiebt sich als Folge von den feineren hin zu den gröberen Fraktionen. Betrachtet man neben dem dominanten Sandanteil auch noch den Grobschluffgehalt, der analog ansteigt, und addiert ihn hinzu, dann erreicht die Summe beider Korngrößen in den Bänken 2 und 8 einen Anteil von 60–80% gegenüber 25–40% im restlichen Profil, was auf eine deutliche Erhöhung der Fließgeschwindigkeit hinweist.

Nach baulichen Veränderungen am Damm und den Auslaßbauwerken und die damit verbundene Vergrößerung des Stauraums erfolgt der Wechsel von sandigen zu feinkörnigeren Sedimenten in den jeweils hangenden Bänken 1 und 7.

Aufgrund der Höhenlage von Bank 1 und der randlichen Position des Profils am Wadirand, was ein niedrigeres Bewässerungsterrassenniveau zur Folge hat, muß das Top von Profil 4 eindeutig mit der Bewässerungsperiode I korreliert werden, die an dieser Stelle schon größtenteils erodiert ist.

Die 3,60 m mächtigen Ablagerungen von Bank 2 bis zu Bank 7 gehören demnach zur nächst älteren Bewässerungsperiode II.

Die darunter folgenden 4,45 m bis zur Basis werden wegen der fehlenden überzeugenden Korngrößenunterschiede komplett in die Periode III gestellt. Allerdings kann auch die Möglichkeit nicht ausgeschlossen werden, daß die Abnahme des Sandgehaltes nach Bank 14 den Umbau des Ableitungsbauwerks N 3' zu N 3 aufzeigt (in Abb. 26 gestrichelt gekennzeichnet).

Ablagerungen, die dem Bauwerk N 4 (Schwellenhöhe 1181,60 m ü. M.) zuzuordnen sind, können trotz der relativen Nähe des Profils nicht erwartet werden, da die tiefsten aufgeschlossenen Sedimente ca. 4 m über der postulierten Basisfläche bei Aufnahme der Bewässerung liegen.

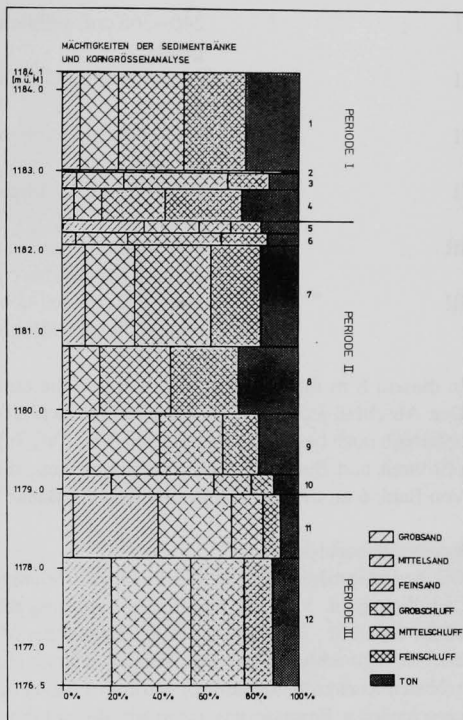


Abb. 27. Korngrößenverteilung in Profil 5.

2.6.5 Profil 5

Lage: Nordoase (s. Taf. 6 b); 1184,50 m ü. M., eben

Nutzung: ehemalige Oase; Wüste

Substrat: Oasesediment, (Abb. 27)

Bewässerungs- periode	Bank	
I	1	0–120 cm, gelblich, toniger Schluff (tU), Humusgehalt 0,6%, Kalkgehalt 11%, Krümelgefüge
I	2	120–150 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,5%, Kalkgehalt 11%, Krümelgefüge
I	3	150–170 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,5%, Kalkgehalt 14%, Krümelgefüge
I	4	170–210 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,7%, Kalkgehalt 11%, Krümelgefüge
II	5	210–225 cm, gelblich, sandig-schluffiger Lehm, (suL), Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 7%, Krümelgefüge
II	6	225–240 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,4%, Kalkgehalt 14%, Krümelgefüge

II	7	240–365 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,4 %, Kalkgehalt 11 %, Kohärentgefüge
II	8	365–450 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,6 %, Kalkgehalt 11 %, Kohärentgefüge
II	9	450–525 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,2 %, Kalkgehalt 12 %, Kohärentgefüge
II	10	525–550 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 10 %, Kohärentgefüge
III	11	550–630 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,2 %, Kalkgehalt 8 %, Kohärentgefüge, Wurzelröhrchen
III	12	630–800 cm, gelblich, tU, Humusgehalt 0,3 %, Kalkgehalt 11 %, Kohärentgefüge, Wurzelröhrchen.

In diesem 8 m mächtigen Profil variieren die einzelnen Bankmächtigkeiten zwischen 15 und 170 cm. Den Abschluß jeder Bank bildet eine Ton-Schluff-Kruste, die durch helle Kalkanreicherung ober- und unterhalb noch besonders betont wird (vgl. Taf. 7c). Über das gesamte Profil sind kleine und große Wurzelröhren und Bodenfragmente zu beobachten, die auf ausgeprägte ackerbauliche Nutzung hindeuten. Von Bank 6 an tritt anstelle der kompakten Bänke ein eher krümeliges Gefüge, das bis zum Top reicht.

Korngrößenanalyse

Die Sedimentbänke des Profils 5 sind als lehmiger Schluff oder als sandiger Schluff zu bezeichnen. Lediglich Bank 5 ist als schluffiger Lehm ausgebildet. Der Schluffanteil beträgt, mit Ausnahme der Bänke 5 und 11, 70–80 %, wobei bis Bank 5 der Mittelschluff dominiert, während in den liegenden Bänken der Grobschluff überwiegt. Auch der Sandgehalt ist in den höheren Bereichen weitaus geringer. Die größten Korngrößenzusammensetzungen haben die Bänke 5 und 11. Sie erweisen sich als letzte Glieder verschiedener Bewässerungsperioden, die mit der Aufsedimentation des Stauraums und dem damit verbundenen Transport größerer Kornfraktionen auf die Feldflächen endeten. Nach der folgenden Erhöhung der Damm- und Auslaßbauanlagen fand die Sedimentation dieser Korngrößen wieder überwiegend im vergrößerten Stauraum statt.

Die Bauwerksveränderungen wurden durchgeführt, als in diesem Profil Feldhöhen von 1182,40 m ü. M. und 1178,50 m ü. M. erreicht waren. So werden die obersten 2,40 m Sedimente mit der letzten Bewässerungsperiode I korreliert, die mittleren 3,50 m mit der Periode II und die unteren 2,40 m sind der Periode III zugehörig.

2.6.6 Profil im Hauptverteiler

Lage: Nordoase (s. Taf. 6b); 1196,33 m ü. M., eben

Nutzung: ehemaliger Hauptkanal, Wüste

Substrat: Kanalsediment, (Abb. 28)

Bewässerungs- periode	Bank	
I	1	0–110 cm, bräunlich, schluffiger Sand (uS), Einzelkorngefüge, an der Basis Kiese
I	2	110–126 cm, hell-braun, uS, Einzelkorngefüge
I	3	126–146 cm, hell-braun, lehmiger Sand (IS), Einzelkorngefüge
I	4	146–174 cm, gelblich, sandig-schluffiger Lehm (suL), Kohärentgefüge

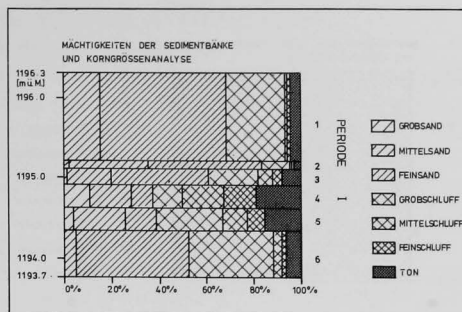


Abb. 28. Korngrößenverteilung des Profils im Hauptverteiler.

I	5	174–202 cm, gelblich, suL, Kohärentgefüge, Feinsandlinsen, Holzkohle- reste
I	6	202–260 cm, gelblich-weiß, uS, Kohärentgefüge.

Während der Felduntersuchungen bestand die Möglichkeit, in einer 2,60 m tiefen Grabung im Hauptverteiler Untersuchungen vorzunehmen. Dabei wurden zum einen die Schichtmächtigkeiten vermessen und zum anderen jeder Schicht eine Sedimentprobe entnommen.

Besonders auffällig ist der enorme Sandanteil (40–80%) dieser höchsten Sedimente des Hauptverteilers (Taf. 8a). Die Erosion am Fundort (1196,33 m ü. M.), der an drei Seiten von hohen Mauern umgeben ist, kann vernachlässigt werden, so daß davon auszugehen ist, daß es sich um einen Teil der letzten Bewässerungssedimente handelt. Da im Hauptverteiler keine Sedimentrückhaltevorrichtungen eingebaut waren, kann vorausgesetzt werden, daß die Sedimentfracht in gleicher Zusammensetzung auch durch den Hauptverteiler in die Kanäle und auf die Feldflächen transportiert wurde.

Die Situation und Sedimentzusammensetzung ist ähnlich den Bedingungen auf der Südoase unmittelbar vor ihrer Aufgabe, die ca. 300 Jahre früher erfolgte (vgl. Kap. 3.4). Auch dort gelangten Sedimente mit sehr hohem Sandgehalt (80%) zur Ablagerung. Da auf Grund der hydraulischen Bedingungen der Weiterbetrieb über längere Zeit noch gewährleistet war, müssen andere Ursachen zur Aufgabe der Nordoase geführt haben.

So könnte die Aufgabe der Südoase und später der Nordoase durch eine natürliche Ursache, die ungünstige Sedimentzusammensetzung des Bewässerungswassers, erzwungen worden sein.

2.6.7 Profil 6

Lage: Südoase (s. Taf. 6 b); 1191,60 m ü. M., eben

Nutzung: ehemalige Oase; Wüste

Substrat: Oasensediment, (Abb. 29)

Bewässerungs- periode	Bank	
I	1	0–10 cm, bräunlich, schluffiger Sand (uS), Einzelkorngefüge, an der Basis Kalksteinbruchstücke
I	2	10–55 cm, hell-braun, uS, Einzelkorngefüge

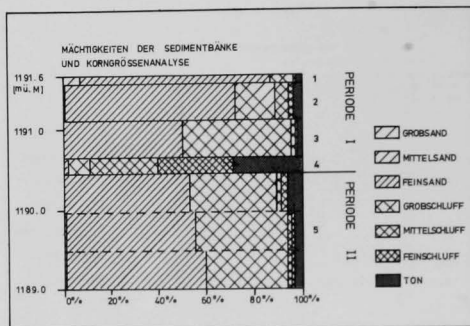


Abb. 29. Korngrößenverteilung in Profil 6.

I	3	55–100 cm, hell-braun, uS, Einzelkorngefüge
I	4	100–120 cm, gelblich, schluffiger Lehm (uL), Kohärentgefüge, Bodenfragmente, Osteokolle
I	5	120–260 cm, bräunlich, uS, Einzelkorngefüge, vereinzelt Osteokolle.

Die hangenden Bänke 1, 2 und 3 sind sehr sandig, schwach verfestigt und nur nach der Körnung differenzierbar. An der Basis der obersten Sedimentbank 1 ist eine Anhäufung von größeren eckigen Kalksteinbruchstücken vom Ġabal Balaq zu beobachten, die auf eine ausgedehnte Bewässerungspause zwischen den Perioden II und I hinweisen.

Darunter folgen 20 cm sehr hartes, helles Sediment mit Kohärentgefüge. Zusätzlich sind in Bank 4 Bodenfragmente und Osteokolle zu beobachten.

Die Basis dieses Südoasenprofils wird von einer 140 cm mächtigen Bank, die sandreich, bräunlich und nicht differenzierbar ist, gebildet. Sie enthält vereinzelt Osteokolle und besitzt ein ausgeprägtes Einzelkorngefüge, das dementsprechend wenig verfestigt ist.

Obwohl keine Schichtung erkennbar ist, bedeutet das in diesem besonderen Fall nicht, daß das Sediment über das ganze Profil ackerbaulich genutzt wurde. Dieses Phänomen kann zusätzlich auch in dem sehr hohen Sandgehalt und der damit verbundenen Gleichförmigkeit und/oder in einer sehr raschen Ablagerung begründet sein, wodurch eine Sortierung nach Korngrößen unmöglich gemacht wird.

Korngrößenanalyse

Die Ablagerungen des Profils 6 zeigen sehr deutlich, daß der oberste Abschnitt der Südoasensedimente besonders sandreich ist. Dies ist jedoch nur dann zu erklären, wenn die Geschiebefracht trotz gleichmäßiger Wasseraufteilung zwischen Nord- und Südbau verstärkt durch den Südbau transportiert wurde. Als Gründe dafür können der Standort des Südbaus unmittelbar am Stromstrich⁸⁹ oder eine erheblich tieferliegende Schwelle im Südbau gelten.

Bank 5 ist durchgehend als schluffiger Sand mit Einzelkorngefüge und geringem Kalkgehalt ausgebildet. In Bank 4 geht der Sandanteil plötzlich von etwa 55% auf nur noch 2% zurück (lehmiger Schluff). In diesem feinkörnigen kompakten Sediment überwiegt ein Kohärentgefüge. Der sprunghafte Abfall des Sandanteils bei 1190,40 m ü.M. muß auf bauliche Veränderungen im Dammbereich (Damm- und Schwellenerhöhung im Südbau – Vergrößerung des Stauraumvolumens) zurückgeführt werden.

⁸⁹ H. Scheuerlein, Die Wasserentnahme aus geschiebeführenden Flüssen, 1984.

Die schnelle kontinuierliche Steigerung des Grobsand-Gehalts bis zu 87% bei nur 1 m Sedimenthöhe zeigt jedoch, daß die letzte Bauwerksveränderung nur einen zeitlich relativ kurzen positiven Einfluß auf die Südoasenablagerungen besaß. Bei dem die Entwicklung abschließenden Sand ist aufgrund der ungünstigen Porenverteilung und der damit verbundenen geringen Speicherkapazität von pflanzenverfügbarem Wasser die landwirtschaftliche Nutzung (bei einmaliger Einstaubewässerung) sicherlich an ihre Grenzen gestoßen. Schon aus diesem Grund kann die Südoase früher als die Nordoase aufgegeben worden sein. Wegen der Höhenlage des Profils muß die Bauwerksänderung bei 1190,40 m ü. M. mit dem Übergang von dem Auslaßbauwerk S 2 zu dem Auslaßbauwerk S 1 in Verbindung gebracht werden. Durch Übertragung dieser Grenze in den aufgenommenen Schnitt durch die Südoase (Abb. 33) ergibt sich eine maximale Mächtigkeit der zur Bewässerungsperiode I zu zählenden Sedimente von 2,20 m. Die Umrechnung dieses Wertes in die Betriebsdauer von Bauwerk S 1 wird mit der ermittelten Sedimentationsrate von 7 mm/a durchgeführt. Damit ergibt sich eine Betriebszeit von S 1 von rund 310 Jahren.

2.6.8 Profil 7

Lage: Südoase (s. Taf. 6 b); 1189,00 m ü. M., eben
 Nutzung: ehemalige Oase; Wüste
 Substrat: Oasensediment, (Abb. 30)

Bewässerungs- periode	Bank	
II	1	0–185 cm, rötlich, Kohärentgefüge. Aufgrund der Mächtigkeit wurden vier Proben entnommen: 10 cm, toniger Schluff (tU) 60 cm, tU 110 cm, sandiger Schluff (sU) 160 cm, schluffiger Sand (uS)
III	2	185–277 cm, rötlich, uS, Kohärentgefüge, viele Osteokolle
III	3	277–302 cm, rötlich, uS, Kohärentgefüge, Osteokolle
III	4	302–327 cm, grünlich, sU, Einzelkorngefüge, Bodenfragmente, Osteokolle, die obersten 5 cm gehen ins Rötliche über
III	5	327–352 cm, rötlich, schluffiger Lehm (uL), Kohärentgefüge, Osteokolle
IV	6	352–387 cm, grünlich, toniger Schluff (tU), Kohärentgefüge, Osteokolle.

Die Bänke 1 bis 3 am Top des Profils unterscheiden sich nur in der Mächtigkeit und damit in der unterschiedlichen Dauer der Ablagerungsbedingungen. Sie sind einheitlich rötlich, sehr hart und homogen. Sie verfügen über dicke Wurzelkanäle, die sekundär mit nachrieselndem Sediment gefüllt sind. Die liegende Bank 4 (25 cm) besitzt eine leichte Grünfärbung, was auf Reduktionsbedingungen hindeutet. In den obersten 5 cm tritt ein Farbwechsel ins Rötliche, also in den oxidierenden Bereich auf. Die gesamte Bank ist ungeschichtet, schwächer verfestigt und besitzt im oberen Teil zunehmend Bodenfragmente und vereinzelt größere Wurzelröhren ($\varnothing$ 1 cm). Bank 5 (25 cm) unterscheidet sich von Bank 4 lediglich durch die eher rötlich-violette Farbe. Bank 6 an der Basis des Profils ist unmittelbar dem anstehenden Fels des Ġabal Balaq al-Ausaq aufgelagert. Die 35 cm mächtigen Sedimente sind homogenisiert, also ungeschichtet und stark verfestigt, und weisen Osteokolle auf.

Korngößenanalyse

Da Bank 1 ca. 185 cm mächtig ist, wurden vier Proben bei 10 cm, 60 cm, 110 cm und 160 cm genommen

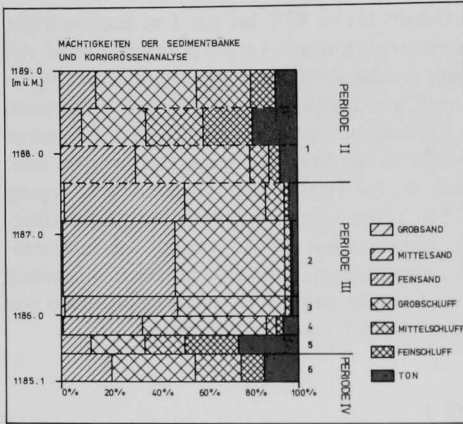


Abb. 30. Korngrößenverteilung in Profil 7.

und bearbeitet. Im Hangenden der untersten Probe bei ca. 1187,60 m ü. M. tritt ein plötzlicher Wechsel vom liegenden schluffigen Sand (uS) zum hangenden sandigen Schluff (sU) auf. Als die Südoase bis zu dieser Höhe aufsedimentiert war, erfolgte eine Erhöhung der Bauwerke im Dammbereich, so daß die gröbere Sandfraktion eine gewisse Zeit verstärkt im Stauraum abgelagert wurde.

Die Übertragung dieser Höhe in den Querschnitt durch die Südoase (Abb. 33) zeigt, daß es sich bei dieser Bauwerksveränderung um den Übergang vom Bauwerk S 3 zum Bauwerk S 2 handelt. Der nächst ältere Bauwerkswechsel von S 4 zu S 3 ist in diesem Profil an der Grenze von Bank 1 zu Bank 2 bei ca. 1185,45 m ü. M. durch eine deutliche Abnahme des Sandgehaltes dokumentiert.

2.6.9 Profil 8

Lage: Südoase (s. Taf. 6b); 1186,60 m ü. M., eben

Nutzung: ehemalige Oase; Wüste

Substrat: Oasensediment, (Abb. 31)

Bewässerungs- periode	Bank	
III	1	0–40 cm, gelblich, toniger Schluff (tU), Kohärentgefüge, sehr viele Osteokolle
III	2	40–80 cm, gelblich, sandiger Schluff (sU), Einzelkorngefüge
III	3	80–160 cm, gelblich, sU, Kohärentgefüge, sehr viele Osteokolle
IV	4	160–220 cm, gelblich, schluffiger Sand (uS), Krümelgefüge
IV	5	220–275 cm, gelblich, tU, Kohärentgefüge, sehr viele Osteokolle
IV	6	275–395 cm, gelblich, tU, Kohärentgefüge, sehr viele Osteokolle
IV	7	395–415 cm, gelblich, tU, Kohärentgefüge, sehr viele Osteokolle
IV	8	415–435 cm, gelblich, tU, Kohärentgefüge, sehr viele Osteokolle
IV	9	435–455 cm, gelblich, tU, Kohärentgefüge, sehr viele Osteokolle
IV	10	455–490 cm, gelblich, tU, Kohärentgefüge, sehr viele Osteokolle
IV	11	490–510 cm, gelblich, sU, Kohärentgefüge, sehr viele Osteokolle
V	12	510–540 cm, gelblich, uS, Kohärentgefüge, sehr viele Osteokolle
V	13	540–685 cm, gelblich, sU, Kohärentgefüge, sehr viele Osteokolle.

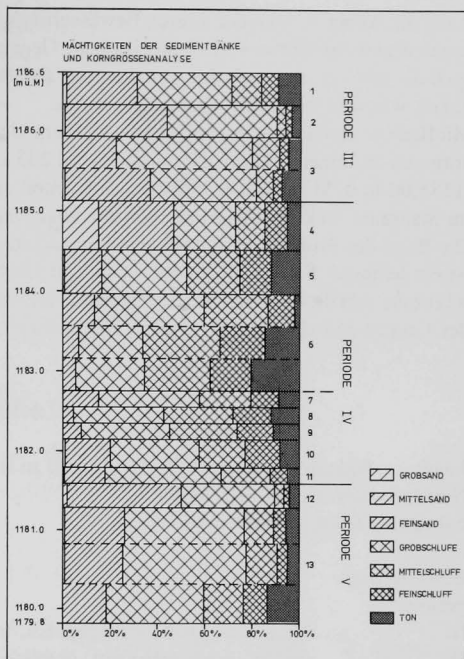


Abb. 31. Korngrößenverteilung in Profil 8.

Profil 8 liegt in derselben Erosionsrinne wie die Profile 6, 7 und 9. Hier ist aber das mesozoische Deckgebirge noch nicht freigelegt. Am Top weisen die Sedimentbänke 2 und 4 ein vom restlichen Profil abweichendes Gefüge auf.

Während Bank 4 ein Krümelgefüge mit locker verfestigten Aggregaten aufweist, zerfallen die Ablagerungen von Bank 2 bei Druck sofort in Einzelkörner.

Alle anderen Sedimentbänke besitzen ein homogenes Kohärentgefüge mit zahlreichen Bodenfragmenten und Wurzelröhren. Auf der Innenseite vieler Röhren sind Toncutane abgelagert, die Trockenrisse haben. Diese Röhren waren nach der Zersetzung der Wurzeln offenbar schon weitgehend versiegelt, so daß kein Sedimentmaterial nachrutschen konnte. Andere Röhren sind dagegen mit Sedimentmaterial gefüllt, das die Wurzeln substituiert und deren Form nachzeichnet.

Im unteren Teil des Profils (Bank 11) ist die organische Substanz einer Wurzel ($\varnothing$ 4 cm) erhalten.

Bank 12 ist vermutlich durch verbliebene Spuren organischen Materials, dunkler als die anderen Schichten. Es scheint eine Doppelnutzung in Form von Wechselkulturen und Dauerkulturen gegeben zu haben. Die landwirtschaftliche Nutzung dieses Teils der Oase scheint aber überwiegend von Wechselkulturen bestimmt worden zu sein.

Korngrößenanalyse

Die zur Bewässerungsperiode II gehörende Abfolge beginnt in Bank 3 schon sehr grobkörnig, was mit einer nicht sehr bedeutenden Vergrößerung des Stauraumvolumens nach dem Umbau gleichzusetzen ist. In Bank 2 erlangt der Sand- und Grobschluffanteil einen Prozentsatz von rund 90%, nimmt in Bank 1 jedoch wieder ab, so daß nach der Ablagerung von Bank 2 das Bauwerk S 2 vermutlich erhöht bzw. umgebaut wurde.

Auch die Ablagerungen der älteren Bewässerungsperiode III lassen nach Bank 7 kleinere Umbauten am zugehörigen Auslaßbauwerk S 3 erkennen. Gegen eine völlige Neukonstruktion des Bauwerks spricht auch die mit 115 cm, nach den vorliegenden Erfahrungen und Ergebnissen, nur geringe Sedimentmächtigkeit während dieser Bewässerungsperiode.

Mit Bank 6 setzt wieder der nach Bauwerksveränderungen übliche Zyklus ein; beginnend mit einem feinkörnigen lehmigen Schluff (IU) und endend 235 cm höher mit einem schluffigen Sand (uS) in Bank 4 (1185,00 m ü. M.). Hier erreicht der Sandanteil etwa 50%, was für die vollständige Aufsedimentation im Stauraum und das Funktionsende des zugehörigen Bauwerks S 3 spricht.

Die Basis des Profils bilden Ablagerungen, die in die Bewässerungsperiode IV zu stellen sind. Bank 13 ist ein lehmiger Schluff (IU). Der Sand- und Grobschluffgehalt liegt in Bank 12 bei 90%. In Bank 11 folgt eine plötzliche Abnahme des Sandanteils, was nur mit einer Erhöhung des Stauraumvolumens an der Grenze zwischen Bank 12 und 11 zu erklären ist.

2.6.10 Profil 9

Lage: Südoase (s. Taf. 6b, 8b); 1186,20 m ü. M., eben

Nutzung: ehemalige Oase; Wüste

Substrat: Oasensediment, (Abb. 32)

Bewässerungs- periode	Bank	
III	1	0–40 cm, gelblich, toniger Schluff (tU), Kohärentgefüge, Osteokolle
IV	2	40–165 cm, gelblich, Krümelgefüge, große Osteokolle Aufgrund der Mächtigkeit wurden drei Proben entnommen: 40–80 cm, schluffiger Sand (uS) 80–120 cm, uS 120–165 cm, sandiger Schluff (sU)
IV	3	165–200 cm, gelblich, tU, Krümelgefüge, große Osteokolle
IV	4	200–300 cm, gelblich, tU, Krümelgefüge, große Osteokolle
IV	5	300–308 cm, gelblich, tU, Kohärentgefüge
IV	6	308–388 cm, gelblich, tU, Kohärentgefüge, wenige, feine Osteokolle
V	7	388–468 cm, gelblich, tU, Kohärentgefüge, wenige, feine Osteokolle
V	8	468–568 cm, gelblich, tU, Kohärentgefüge, wenige, feine Osteokolle
V	9	568–611 cm, gelblich, schluffiger Lehm (uL), Krümelgefüge, von 547–551 cm feingeschichtet (16 Schichten)
V	10	611–626 cm, gelblich, Schluff (U), Einzelkorngefüge, kleine Osteokolle, intern feingeschichtet (1–2 mm)
V	11	626–698 cm, gelblich, U, Kohärentgefüge, stark durchwurzelt
VI	12	698–758 cm, gelblich, tU, Kohärentgefüge, stark durchwurzelt.

Die Sedimentbänke 1 bis 8 sind ackerbaulich genutzt worden. Das ist an der zerstörten Primärschichtung, den Bodenfragmenten und den vielen Wurzelröhren zu erkennen. Die einzelnen Bänke sind lediglich durch Schichtfugen getrennt, um die gelegentlich helle Kalkanreicherungen zu beobachten sind. Während die Bänke 5 bis 8 bei starkem Kohärentgefüge überwiegend kleine Wurzelröhren aufweisen, sind oben mit zunehmendem Krümelgefüge und abnehmender Verfestigung (Bänke 1 bis 4) sehr viele Wurzelkanäle erhalten, die auch Durchmesser bis zu 2 cm aufweisen. Dies spricht neben dem Anbau von Wechsellkulturen auch für die Existenz von Dauerkulturen. Offensichtlich sind die Dauerkulturen

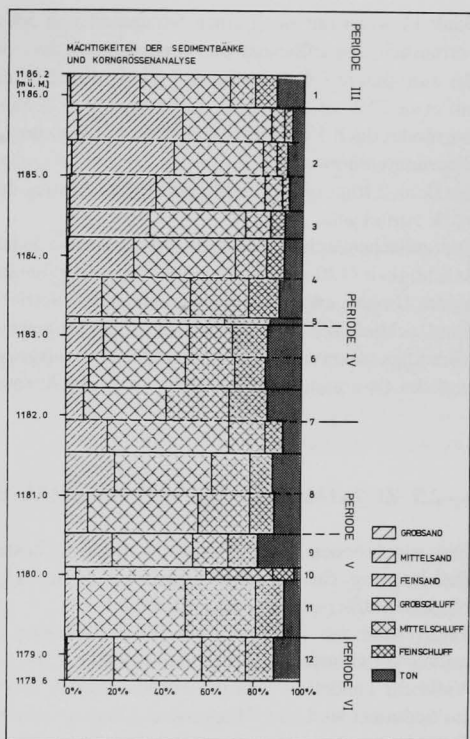


Abb. 32. Korngrößenverteilung in Profil 9.

sowohl diesen Schichten unmittelbar als auch hangenden Schichten zuzuordnen, weil die Entwicklungsmöglichkeiten des Wurzelraums in dem lockeren Sediment mit seiner geringeren Lagerungsdichte besser sind.

Die Sedimentbank 9 (43 cm) ist weitgehend homogenisiert und besitzt ein ausgeprägtes Krümelgefüge mit eckigen Aggregaten. Die obersten 4 cm sind feingeschichtet und bestehen aus 16 Lagen, also im Schnitt 0,25 cm pro Lage.

Die Bank 10 ist aus einzelnen Lagen von etwa 1 cm Dicke aufgebaut, die wiederum in sich feingeschichtet (1 bis 2 mm) und von vielen Wurzelröhrchen durchzogen sind. Dies ist die älteste Sedimentbank der Südoase, die eindeutig nie ackerbaulich genutzt wurde. Die Zugehörigkeit der beobachteten kleinen Röhren zu Dauerkulturpflanzen ist wenig wahrscheinlich. Offenbar handelt es sich um eine ehemalige Brache, die von niedrigen Pflanzen bewachsen war.

Die Basis des Profils wird auf den mesozoischen Kalken und Kalkgeröllen von den Bänken 11 und 12 gebildet, die mäßig verfestigt sind und keine primäre Schichtung mehr erkennen lassen. Sie waren stark durchwurzelt und Bodenfragmente bezeugen die ackerbauliche Bearbeitung.

Korngrößenanalyse

Die direkt der Kalksteinbasis aufliegende Bank 12 ist verhältnismäßig sandig ($\approx 20\%$). Dieser Sandanteil kann mit den durch die Kalkauflösung freigesetzten Verunreinigungen der mesozoischen Sedimente im Zusammenhang stehen. Wahrscheinlicher ist jedoch die Annahme, daß die Sandfraktion mit dem Bewässerungswasser auf die Feldfläche gelangte.

Bank 11 weist nur noch einen Sandanteil von 5% auf, so daß die Schichtgrenze bei 1179,20 m ü. M. vermutlich den frühesten Bauwerksumbau bzw. -wechsel anzeigt.

Bis zum unteren Teil der Bank 7 (0 bis 40 cm) steigt die Summe des Sand- und des Grobschluffanteils auf etwa 70% an. Erst dann, bei 1181,90 m ü. M., erfolgt der Beginn eines neuen Ablagerungszyklus, begründet durch Veränderungen (Erhöhungen) der Auslaßbauwerke bei gleichzeitiger Vergrößerung des Stauraumvolumens.

Bis Bank 2 folgt nun ein kontinuierlicher Anstieg des Sandgehaltes, der nur in Bank 5 (1183,10 m ü. M.) stark zurückgeht.

Die zwischenzeitlich seit dem letzten Bauwerksneubau abgelagerten Sedimente besitzen eine geringe Mächtigkeit (120 cm), so daß ein kompletter Neubau sehr unwahrscheinlich erscheint. Viel eher ist mit einem Umbau während der entsprechenden Betriebsperiode zu rechnen. Mit Bank 2, einem schluffigen Sand, schließt die Sequenz ab. Die Ablagerungen nach den Veränderungen am Südbau (Bank 1) beginnen allerdings schon sehr sandig, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die Erhöhung der Bauwerke und des Stauraumvolumens nicht mehr die Ausmaße früherer Änderungen besaß.

2.7 ZUSAMMENFASSENDE BESCHREIBUNG DER BEWÄSSERUNGSSEDIMENTE

Die allochthonen Ablagerungen von Märüb bestehen aus dem Sedimentmaterial der anthropogenen Bewässerung. Sie zeigen im Gegensatz zu einem gewachsenen Boden kein genetisches Bodenprofil mit einzelnen unterscheidbaren Horizonten.

Daher kann das Sediment auch nicht als Boden im engeren Sinne bezeichnet werden. Aufgrund der ariden Verhältnisse und des niedrigen Alters hat noch keine sichtbare Bodenentwicklung stattgefunden. Vielmehr handelt es sich um ein klassisches Sedimentgestein, das landwirtschaftlich genutzt wurde.

Im Sediment sind aber Hinweise auf bodenbildende Prozesse, wie basalte Carbonatanreicherungen und Tonbeläge in Wurzelröhren vorhanden. Diese Merkmale müssen aber in engem Zusammenhang mit der Bewässerung und Nutzung gesehen werden. Eine Profilentwicklung wurde ferner durch die Sedimentschübe und die mechanische Bearbeitung gestört.

Die Oasensedimente lassen sich in zahlreiche Bänke untergliedern, die im Durchschnitt zwischen 20 und 80 cm mächtig sind. Dieser Wechsel korrespondiert vermutlich mit dem durch Bauwerksveränderungen an den Verteilern erzielten Höhengewinn zwischen 30 und 80 cm. Die jeweiligen Bankgrenzen werden von tonig-schluffigen Krusten gebildet, die stärkere Verdichtungshorizonte anzeigen. Kalkanreicherungen über und unter den Schichtfugen deuten darauf hin, daß die Kalkschichten sowohl von unten aus aufsteigendem Wasser als auch aus perkolierendem Sickerwasser gebildet wurden und somit sekundäre Ausfällungen darstellen. Die Sedimentpakete sind von Bodenfragmenten, Tiergängen und einer mehr oder weniger großen Zahl von Wurzelröhrchen durchsetzt (Taf. 8c).

Wenn die Bänke – was selten vorkommt – nicht anthropogen durchmischt sind, kann man in ihnen eine sehr feine gradierte Schichtung erkennen. Demnach fand eine vertikale Korngrößensortierung von grob (unten) nach fein (oben) statt. Den Abschluß jeder Schicht bildet eine sehr dünne tonig-schluffige Kruste, die um so dichter und feiner ist, je bindiger die Ablagerungen sind (Taf. 8d). Die feinen Teilchen besitzen aufgrund ihrer sehr großen Oberfläche und den damit verbundenen starken Oberflächenkräften eine hohe Kohäsion. Jede gradierte Schicht ist einem Bewässerungsereignis mit langsamer Sedimentation zuzuordnen. Im turbulenten Wasser dagegen wird das Sediment homogen, d. h. unsortiert abgesetzt. Die einzelnen Schichten besitzen eine Dicke von 0,6–9,5 mm.

Der häufigste gemessene Wert beträgt ca. 3,2 mm. Bei einer vorausgesetzten Bewässerung zu jeder Regenzeit addiert sich eine jährliche Sedimentationsrate von 6,4 mm.

Das Abmessen der abgelagerten Schichten, die einer einmaligen Bewässerung entsprechen, stellt somit

die einfachste, aber auch unsicherste Methode zur Bestimmung der jährlichen Sedimentationsrate dar. Laboruntersuchungen belegen einen Kalkgehalt der Schichten zwischen 7 und 18%, jedoch meistens um 12%. Der Kalk ist aus dem Wasser ausgefällt, hat das ursprüngliche Einzelkorngefüge verkittet und ein Kohärentgefüge ausgebildet, daß die charakteristische hohe Standfestigkeit begründet.

Allerdings ist auch mit einem primären Kalkanteil im Sediment zu rechnen, da im Einzugsbereich der Wadis mesozoische Kalke anstehen. Die heutigen fluviatilen Sedimente enthalten im Wādī Dana 2,3% und im Wādī Ġufayna 9,6% Carbonat. Das Einzugsgebiet des Wādī Ġufayna hat einen höheren Anteil an mesozoischen Kalken als das des Wādī Dana.

Die dominierenden Korngrößen liegen im Schluffbereich (U), insbesondere im Grobschluffbereich. Daneben sind bis zu 20% Ton und stark schwankende Sandanteile ermittelt worden.

Der vorhandene Sandanteil trägt gewöhnlich wenig zur Nährstoffversorgung bei, begünstigt aber die Wasserbeweglichkeit und die Luftzirkulation. Die Sandfraktion der Oasesedimente besteht vorwiegend aus Glimmern (Muskovit und Biotit), was für die Kaliumversorgung der Pflanzen von Bedeutung war. Der überwiegende Teil der Ablagerungen wird von der Schlufffraktion gebildet. Während der Mittel- und Feinschluff für die Bewirtschaftung ungünstige Eigenschaften wie dichte Lagerung, Verschlammung, Wasserstau, schlechte Durchlüftung aufweist, sind grobschluffreiche Böden gute Ackerböden, die leicht zu bearbeiten sind und günstige Fruchtbarkeitseigenschaften besitzen.

Die mineralischen Anteile der Sedimente sind überwiegend Quarz, Feldspäte, Biotit, Muskovit und Chlorit. Davon sind besonders die Glimmer in der Sandfraktion angereichert.

Die pH-Werte aller Bodenproben liegen zwischen 7,5 und 8. Sie überschreiten damit den optimalen Bereich zwischen pH 5,0–7,5 nur wenig. Die untersuchten Proben hatten einen Humusgehalt zwischen 0,15% und 0,7% und sind daher als humusarm einzustufen. Die gegenwärtigen Humusgehalte dürften aber erheblich unter denen zur Zeit der Bewirtschaftung liegen. Die Fruchtbarkeit des Sediments ist in seiner Mineralzusammensetzung und Textur zu sehen, wobei das Verhältnis der Sand-, Schluff- und Tonfraktion entscheidend ist.

Zusammenfassend läßt sich das Sediment als hellgelb, gebankt, schwach verfestigt, porös, stark carbonathaltig und gut sortiert beschreiben. Bei ackerbaulicher Nutzung ist es homogenisiert, bei Dauerkulturen intern feingeschichtet.

Eine besondere Eigenschaft des lößähnlichen Oasesediments ist seine Standfestigkeit, die auf Verbackung der Teilchen durch Calciumcarbonat beruht.

In den Erdringen nehmen auch organische Stoffe Einfluß auf die Stabilität. Auf Grund dieser Verfestigungen bilden sich vertikale Klüfte und Schluchten an den Rändern der Oase. Lediglich auf geeigneten Flächen kommt es nach Starkregen zu Oberflächenabfluß- und Abspülungserscheinungen. Die anthropogene Kleinterrassierung stabilisiert jedoch das Relief.

Das Gefüge der Bewässerungssedimente ist meist ein Einzelkorn- oder ein Kohärentgefüge. Das Einzelkorngefüge herrscht bei den bewässerten, aber nicht bearbeiteten Dauerkulturflächen vor. Dort ist jeder Bewässerungsgabe eine Sedimentschicht zuzuordnen, die oben mit einer tonig-schluffigen Verschlammungskruste abschließt.

Besonders auffällig ist das Zusammentreffen von Einzelkorngefüge, hohem Sandanteil und geringem Kalkgehalt.

Die fluviatil bedingte horizontale Feinschichtung der nicht anthropogen gestörten Dauerkulturflächen ist recht ungünstig, weil der nutzbare Wasservorrat, die Wasserbewegung sowie das Tiefenwurzelwachstum negativ beeinflußt werden. Die gleichen unerwünschten Phänomene können aber auch durch Kalk-, Gips- und Salzanreicherungszone in den Böden hervorgerufen werden.

Erst die Zerstörung der Krusten durch Bearbeitung erleichtert dem Wasser die Versickerung. In der Bodenlösung ist auch Kalk vorhanden, der bei Absinken des CO₂-Partialdruckes ausgefällt wird und die Körner verkittet, bis das typische und überwiegende Kohärentgefüge entstanden ist. Die Homogenisierung, d. h. die Auflösung der Schichten der ackerbaulich genutzten Standorte, wird begleitet von einer

Tondurchschlammung. Der Ton lagert sich in Hohlräumen und an Kornoberflächen ab. Die kantig krümeligen Aggregate dürften durch Bodenbearbeitung entstandene Fragmente sein.

Der häufige Wechsel zwischen Austrocknung und Bewässerung verursacht Schrumpfungen und Quellungen (Taf. 9a). Die entscheidende Einflußgröße auf Form und Ausbildung der Trockenrisse ist der Tongehalt. Die im Oberboden beobachteten allseitigen Absonderungen (Prismen) sind die häufigste Gefüge-Form.

Die Trockenrisse unterscheiden sich deutlich von den ebenfalls das Sediment zerteilenden Erdbebenrissen (Taf. 4c). Entscheidend für die Farbe der Sedimente ist das Ausgangsmaterial. Die ursprüngliche Färbung ist hellgelb bis grau. Änderungen können durch Kalkanreicherungen (grau-weiß), Humus (dunkel) sowie durch Redoxprozesse eintreten.

Während nennenswerte Humusgehalte nur in den Erdringen bzw. Erdringstotzen auftreten, sind Kalkanreicherungen häufiger. Zu erwähnen sind hier die hellen Kanalsedimente und die weißen Anreicherungsstreifen in und um die Schichtfugen der Profile. Das ausgefällte Calciumcarbonat füllt allmählich die Poren und Hohlräume, wobei der Horizont graduell noch undurchlässiger für Wasser wird und die Wasserbewegung unterbricht.

Zudem verhindert oder erschwert diese Zone mechanisch das Eindringen von Wurzeln.

Die von der Anlage „al-Mabnā“ ausgehenden Kanäle und Sedimente sind an einer deutlichen Farbänderung ins Rötliche von den gelblich-grauen Oasensedimenten des Hauptverteilersystems zu unterscheiden. Der Wechsel (z. B. im Profil 1, Kap. 2.6.1) ist auf eine plötzlich gestiegene Beimengung von Gesteinsmaterial mit erhöhtem Fe III-Gehalt zurückzuführen. Da solche Bestandteile in den Sedimenten des Wādī Dana nicht beobachtet werden, muß ein anderes Liefergebiet für die Färbung verantwortlich sein. In Frage kommt nur das Wādī Ġufayna, dessen Untergrund an vielen Stellen von Basalten oder deren rötlichem Grus gebildet wird.

Mit dem Bau der ins Wādī Ġufayna gerichteten Hochwasserentlastung am Nordbau der Periode I wurden die Nordoasensedimente in der Rinne bis zur Basis erodiert und die Möglichkeit geschaffen, den Lava-grus aufzuarbeiten und weiter zu transportieren, so daß zu dem normalen Schwebstoffanteil des Wādī Dana auch noch die basaltische Komponente hinzutrat, die die rötliche Farbe verursachte.

3. Zusammenfassung der Ergebnisse

3.1 ENTWICKLUNG DER WESTLICHEN SÜDOASE (AUFGRUND DER SEDIMENTUNTERSUCHUNGEN)

Die Lage der Südoasenprofile in einer bis auf das anstehende Gebirge eingeschnittenen Erosionsrinne ermöglichte die Anfertigung eines Schnittes durch diesen Teil der Oase. In diesem Schnitt wurden die Profile und die Höhenlagen der Änderungen der Sedimentationsbedingungen, die mit Hilfe der Korngrößen- und der Schwermineralanalyse festgestellt wurden, projiziert (vgl. Abb. 33). Die Topographie zeigt eine deutlich ausgeprägte Terrassenanlage.

Wie die Geländebeobachtungen zeigen, versorgte der letzte Hauptkanal ausschließlich die obere Terrasse, während auf der unteren Terrasse die Bewässerung mit der Bewässerungsperiode II und dem zugehörigen Kanal endete.

Dieses Wissen erleichtert die Unterteilung der Oase in die verschiedenen Bewässerungsperioden. Auf der oberen Terrasse wird die Beendigung der Bewirtschaftung höhenmäßig mit den letzten Bauwerkshöhen (1192,60 m ü. M.) gleichgesetzt, so daß von ehemals 220 cm akkumulierten Sedimenten der Periode I ausgegangen wird. Die Erosion seit Aufgabe der Oase liegt hier in einer absoluten Größenordnung zwischen 20 und 180 cm je nach lokalen Gegebenheiten. Im Durchschnitt kann aber wie auf der Nordoase von einem Erosionsbetrag von 1 m ausgegangen werden.

Zum Liegenden hin folgt mit jeder Zusammensetzungsänderungsgrenze eine ältere Periode, die mit einem zugehörigen Auslaßbauwerk korrespondiert.

Schwieriger gestaltet sich die Klassifizierung der unteren Terrasse. Durch Geländebeobachtungen ist gesichert, daß dort die Bewässerung mit dem Ende der Periode II eingestellt wurde. Die fortgeschrittenere Erosion der unteren Terrasse könnte einige für den Aufbau der Oase wichtige Schichten abgetragen haben und direkte Rückschlüsse auf die Entwicklung des am Wadirand gelegenen Teils erschweren.

Aus diesem Grunde werden die maximalen Bewässerungshöhen auf der westlichen Südoase zu Rate gezogen, die für die verschiedenen Bewässerungsperioden durch die Rekonstruktion der Kanalgefälle ermittelt wurden. So sind mit den verschiedenen Bauwerken Bewässerungen bis in folgende Höhen möglich:

Bauwerk	max. Bewässerungs- höhe in m ü. M.	Höhe der Änderungen der Sedimentations- bedingungen in m ü. M.	im Profil	Ablagerungen in cm
S 6	1179,0	1179,20	9	60
S 5	1182,0	1180,50	9	130
		1181,55	8	235
		1181,90	9	270
S 4	1185,4	1182,70	8	115
		1183,10	9	120
		1185,00	8	345
		1185,45	7	
		1185,80	9	390
S 3	1188,0	1187,60	7	max. 260
S 2	1191,7	1190,40	6	280
S 1	1194,0	1192,60		220

Die maximalen Bewässerungshöhen decken sich für die früheren Bauwerke S 6 – S 3 auffällig mit den Höhenlagen der ermittelten Änderungen der Korngrößenzusammensetzungen, so daß man einen Zusammenhang erkennen kann.

Folglich sind auf der Südoase die Bewässerungsareale bis zu dem Niveau bewässert worden, das mit dem jeweiligen Kanal zu erreichen war. Erst dann erfolgte zwangsläufig der Neubau des Südbaus sowie des höheren Hauptkanals.

Die Änderungen der Ablagerungsbedingungen, die während der Betriebszeiten der Bauwerke S 5 und S 4 stattfanden und die in den Oasensedimenten etwa 130 cm über der jeweiligen Basis dokumentiert sind, werden Umbauarbeiten an den Bauwerken zugeschrieben.

Die Korngrößenverhältnisse ändern sich in den verschiedenen Profilen etwa in gleicher Höhenlage, so daß die Oasenentwicklung bis zum Ende von Periode III vermutlich gleichmäßig, d. h. ohne die Anlage größerer Terrassenstufen erfolgte. Mit dem Beginn der Bewässerungsperiode II wird diese Konzeption zugunsten einer Terrassenanlage verändert.

So teilte sich der Kanal KS 2 vor Erreichen der untersuchten Flächen, wie Geländebeobachtungen bestätigen, in zwei Arme auf, die getrennte Gebiete belieferten (vgl. Abb. 33). Durch die Aussparung der mittleren Fläche begann eine Terrassierung der Südoase mit größeren Sprunghöhen. Die Höhe der letzten Bewässerungsbauwerke auf der unteren Terrasse gibt gleichzeitig das ehemalige Niveau der Oberfläche der Periode II wieder. Die Endhöhe von 1190,40 m ü. M. ist auf beiden Terrassen identisch. Die maximal mögliche Bewässerungshöhe wurde aber während der Periode II nicht mehr ausgenutzt, was auf eine im Vergleich zur Nordoase vorzeitige Aufgabe hindeutet.

Die Anhäufung kleinerer Gerölle vom Ġabal Balaq al-Ausaṭ an der Basis der dem Bauwerk S 1 zugeordneten Sedimente unterstützt die Annahme einer längeren Bewässerungspause.

Während der Periode I wurde auf eine Bewässerung der am Wadirand gelegenen Gebiete verzichtet. Dadurch wuchs lediglich die südliche Terrasse an, und es entstand das heutige Erscheinungsbild. Auch in diesen Bereichen wurde die maximal mögliche Bewässerungshöhe nicht ausgenutzt. Zusammen mit

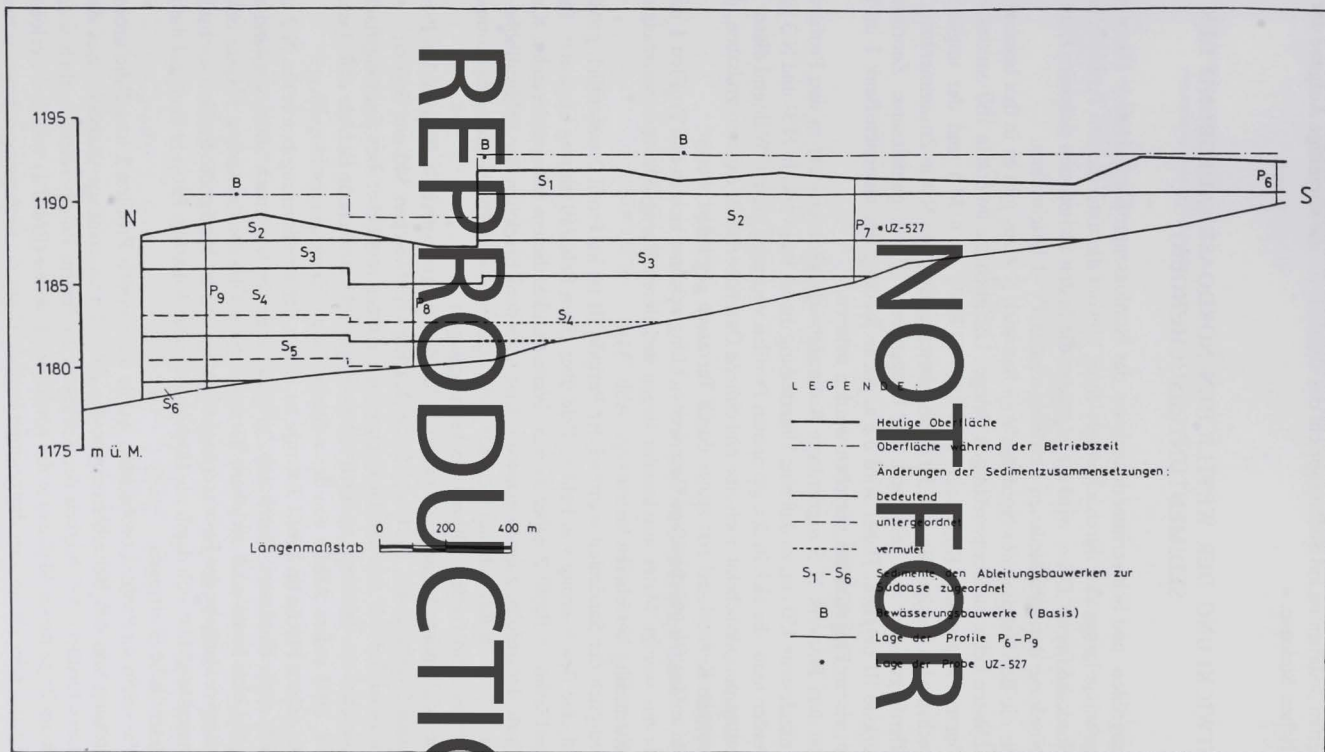


Abb. 33 Nord-Süd-Schnitt durch die westliche Südoase.

horizontal gelagerten Sedimenten am Südbau spricht das ebenfalls für die vorzeitige Aufgabe der Bewässerung der westlichen Südoase.

3.2 ENTWICKLUNG DER WESTLICHEN NORDOASE (AUFGRUND DER SEDIMENTUNTERSUCHUNGEN)

Die aus den Korngrößen- und Schwermineralanalysen der Nordoasenprofile (inklusive Hauptverteiler) gewonnenen Ergebnisse lassen sich durchaus vergleichen, obwohl die untersuchten Profile relativ verstreut über die Nordoase liegen. Daher wird im folgenden die in den Sedimenten sichtbare Entwicklung der westlichen Nordoase der verschiedenen Betriebsperioden IV–I beschrieben.

Periode IV: Für die Bewässerung der Nordoase vom Bauwerk N 4 aus gibt es in den bekannten Aufschlüssen keine hundertprozentigen Belege. Lediglich die untersten 160 cm des Profils 2 könnten wegen der Höhenlage (1176,45–1178,08 m ü. M.) und der ungleichmäßig wechselnden Sandgehalte mit der Bühnenbewässerung von N 4 in Zusammenhang stehen. Allerdings wäre auch eine mit den hangenden 187 cm gemeinsame Zuordnung zur Periode III möglich. Daher wird die zeitliche Stellung der untersten Bank 1 im Profil 2 mit einem Fragezeichen versehen werden müssen.

Periode III: Die dem Bauwerk N 3 zugeordnete Sedimentmächtigkeit erreicht in den Profilen 3 und 4 mindestens 450 cm, so daß eine Unterteilung dieses Bauwerks in N 3' und N 3 gefordert werden muß, die sich in den genannten Profilen vermuten lassen. Während dieser Bewässerungsperiode scheint noch eine einheitliche Oasenoberfläche existiert zu haben, die nach heutigen Kenntnissen erst später durch Terrassen gegliedert wurde.

Die anfänglich gleichmäßige Oasenentwicklung zeichnet sich in den Profilen 1 und 2 ab, die nur wenige Meter auseinander liegen und deren Korngrößenzusammensetzung sich höhenmäßig korrelieren lassen (vgl. Abb. 34).

Lediglich der Sandanteil während der Periode III ist im Profil 2 wesentlich größer, was auf eine Bewässerung von Feld zu Feld über einen Feldwall hinweg hindeutet. Dabei lag die Fläche im Profil 2 näher an dem Wasser und Sediment transportierenden Kanal und wurde demzufolge zuerst eingestaut. Erst nach dem Erreichen der Feldwallhöhe rieselte das Wasser in das dahinter liegende Feld. Dadurch wurden die größeren Komponenten bevorzugt im vorderen Einstaubecken abgelagert.

Periode II: Die vollständige Sedimententwicklung der Bewässerungsperiode II ist in den Profilen 3, 4 und 5 erschlossen. Dort beträgt die Mächtigkeit zwischen 340 und 360 cm.

In dieser Periode tritt die Differenzierung einiger randlicher Bewässerungsflächen der Nordoase ein. Während nördlich des Nordbauwerks zusätzliche Gebiete erschlossen wurden, sind andere Areale von der weiteren Entwicklung ausgeschlossen.

Die untere Fläche im Profil 3 wurde zu Zeiten der Bewässerungsbauwerke N 2 und N 1 nicht mehr bewässert. Durch das Zurückweichen der Oase nach Süden entstand zwangsläufig eine heute noch sichtbare Terrassenstufe. Obwohl das tiefere Plateau etwa 1150 Jahre vor Aufgabe der Bewässerung stillgelegt wurde, beträgt die Erosion höchstens 1 m. Dieser Wert läßt sich damit als Höchstgrenze der äolischen Erosion auch auf die zentrale Oasenfläche übertragen.

Wie schon im Profil 3 beobachtet, wurde auch in den Profilen 1 und 2 die großflächige Nutzung von den Betreibern zugunsten einer Terrassenanlage geändert, was durch die unterschiedliche Mächtigkeit der Sedimente in diesem Randbereich deutlich wird.

Ob im Zuge dieser Maßnahme die nördlichen Flächen (Profil 1) während Periode II aufgegeben oder ob sie über die gesamte Periode II nur deutlich weniger bewässert wurden,

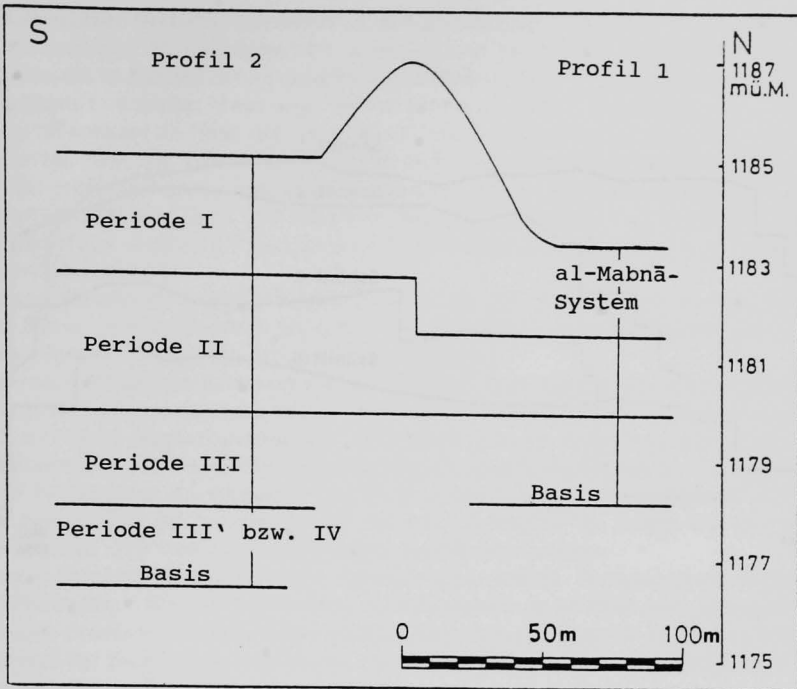


Abb. 34. Sedimentmächtigkeiten der verschiedenen Betriebsperioden in den Profilen 1 und 2.

ist aus den Untersuchungen nicht ersichtlich. Spätestens jedoch mit der jüngsten Betriebsperiode I wurde die Bewirtschaftung der unteren Terrassenfläche nicht mehr vom Hauptverteilersystem durchgeführt.

Periode I: Die dem Auslaßbauwerk N 1 zugeordneten Oasensedimente sind aufgrund ihrer Position überall der Erosion ausgesetzt. Deswegen ist die geschlossene Abfolge mehr oder weniger zerstört. Mit der Projektion der Änderungshöhen der Korngrößenzusammensetzung aus Profil 4 in die rekonstruierte Terrassenanlage des Schnitts 1 läßt sich die Gesamtmächtigkeit aber ausreichend genau bestimmen. So wurden während der Periode I 480 cm sedimentiert.

Die Gesamtmächtigkeit der während der Perioden II und I abgelagerten Sedimente von 8,20 m bietet die Möglichkeit, die jährliche Sedimentationsrate für den zentralen Bereich des Hauptverteilersystems zu überprüfen, da der Beginn und das Ende dieses Zeitabschnitts datiert werden können. So wird der Beginn der Periode II mit Hilfe einer Inschrift am Südbau um 510 v. Chr. nachgewiesen. Das Ende der Periode I ist im Koran beschrieben und liegt um 575 n. Chr. Für die während dieses Zeitraumes abgelagerten Sedimente kann demzufolge eine mittlere jährliche Sedimentationsrate von rund 7 mm/a konstatiert werden ($820 \text{ cm}/1085 \text{ a} = 0,75 \text{ cm/a}$), so daß die vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden.

Mit dem Bau der Anlage „al-Mabnā“ und der Installation eines gänzlich neuen Bewässerungssystems wurden wieder Sedimente auf der seit der Periode II brachliegenden Terrassenfläche des Profils I am

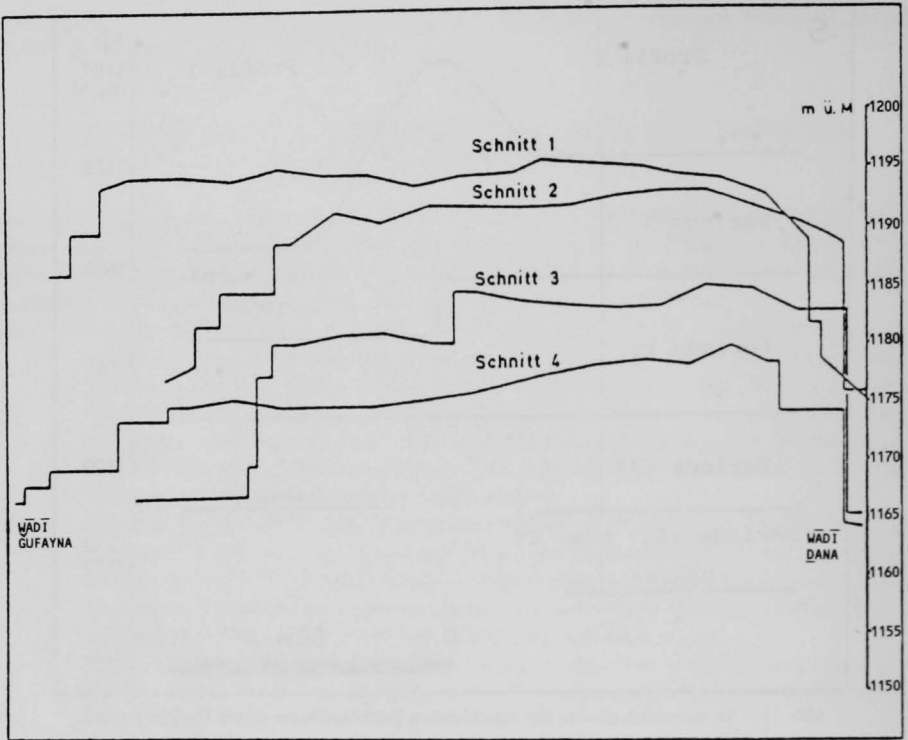


Abb. 35. Projektion der Oasenoberfläche der Nordoase in eine Ebene (Abstand der einzelnen Schnitte 2 km).

Rand des Wādī Ġufayna abgelagert. Die unterschiedlichen Sedimentmächtigkeiten der beiden Systeme belegen natürlich auch unterschiedliche Betriebszeiten.

So ist das „al-Mabnā“-System (180 cm Sedimente in P 1) erst längere Zeit nach dem Bau von N 1 (245 cm Sedimente in P 2) in Betrieb genommen worden. Gleiche Sedimentationsraten von 0,7 cm/a und vor allem gleichmäßige Bewässerung des Profils vorausgesetzt, ergibt sich bei einem Unterschied von 65 cm zugunsten des Hauptverteilersystems eine 90 Jahre spätere Inbetriebnahme des „al-Mabnā“-Systems.

Terrassenanlage der Nordoase

Das Oasensediment erweist sich in geneigten Lagen durch Oberflächenabfluß als leicht erodierbar, daher mußten die Felder so angelegt sein, daß das Wasser nicht zu schnell abfloß, sondern Zeit hatte, im Boden zu versickern. Eine Lösung hierfür bietet die reliefstabilisierende anthropogene Kleinterrassierung, die den fruchtbaren Boden gegen Abspülung sichert und einen zu schnellen Abfluß des Überschußwassers verhindert. Um die trotz allem teilweise noch beträchtlichen Höhenunterschiede zu überwinden, sind unter anderem Absturzbauwerke vonnöten, die an einigen Stellen noch erhalten sind.

Den höchsten Punkt der Nordoase bildete seit der Verlegung der großen Bewässerungsanlage in den Dammbereich (N 3 – N 1) der Hauptverteiler. Er stellt gleichzeitig den Ausgangspunkt der Oase dar, die sowohl in Nord-Süd- als auch in West-Ost-Richtung terrassiert war. Bei vorwiegendem Ostwind wer-

den die letztgenannten Geländestufen stärker erodiert und sind nur an wenigen exponierten Stellen, vorwiegend am Rand zum Wādī Ġufayna oder in eben diesem System noch deutlich zu erkennen.

Die Projektion der im Rahmen der topographischen Geländeaufnahme im Abstand von 2 km angefertigten Oasenschnitte 1–4 in einer Ebene zeigt, daß zwischen den westlichen Schnitten 1 und 2 im Hauptverteilersystem bis etwa auf die Höhe von Dār as-Sawdā' ein durchschnittliches West-Ost-Gefälle von etwa 1‰ besteht (vgl. Abb. 35). Östlich der Grenze bei Dār as-Sawdā', die ungefähr in der Fortsetzung des dort die Oase gradlinig begrenzenden Walls zu sehen ist, erfolgte eine starke Absenkung der Bewässerungsflächen um etwa 6 m, bzw. eine Steigerung des mittleren Gefälles zwischen Schnitt 2 und 3 auf 4,2‰. Auch auf den nächsten 1,5 km (Schnitt 3 + 4) ist das mittlere Gefälle mit ca. 3,3‰ größer als auf den westlichen Flächen.

Die deutliche Sprunghöhe zwischen Schnitt 2 und 3 läßt eine Terrassenstufe in Nord-Süd-Richtung vermuten. Ebenso ist wahrscheinlich das größere mittlere Gefälle zwischen Schnitt 3 und 4 mit einer, wenn auch kleineren Abtreppung, in Verbindung zu bringen.

Aufgrund von hydraulischen Berechnungen wird in einem mittleren Jahr eine Wasserspiegelhöhe von 1198,95 m ü. M. im Hauptverteiler erreicht, so daß die Oase in diesem Gebiet um ca. 2 m erhöht werden konnte, bevor wieder Bauwerkserhöhungen im Dammbereich erforderlich gewesen wären. Bei einer Sedimentationsrate von 0,7 cm/a ergibt sich eine mögliche zusätzliche Betriebszeit von rund 300 Jahren. Durch eine Verlängerung des Hauptkanals bis an die große Terrassenstufe südlich von Dār as-Sawdā' wäre eine Bewässerung der östlichen Areale und der Weiterbetrieb der Anlage von weit über einem halben Jahrtausend ohne bauliche Veränderungen gewährleistet gewesen.

Obwohl diese Sprunghöhen und Terrassen sicherlich schon mehrere Betriebsperioden Bestand hatten, scheinen Überlegungen über die Verlängerung des Hauptkanals nie zur Diskussion gestanden zu haben. Die westlichen Feldflächen müssen derart wichtig gewesen sein, daß nur sie durch ihre Höhenlage die Veränderungen der Dammanlage bestimmten. Aus diesem Grund ist hier eine durchgehende Bewässerung über die gesamte Betriebsdauer anzunehmen.

Für die Mächtigkeitsabnahme der östlichen Bewässerungsflächen sind zwei Erklärungsmöglichkeiten denkbar:

1. Diese Felder wurden erst wesentlich später kontinuierlich bewirtschaftet.
 2. Die Partien wurden zwar seit Beginn bewässert. Es wurden jedoch nur Überschußmengen bei überdurchschnittlichen Ereignissen aufgeleitet, so daß eine unregelmäßige Nutzung vorgenommen wurde. Eine endgültige Klärung des Sachverhaltes ist schwierig. Dennoch läßt die Existenz des auf dem Untergrund errichteten Walls bei Dār as-Sawdā', der Oasensedimente auf der einen von unfruchtbarer Basaltwüste auf der anderen Seite trennt und in dessen Verlängerung die ausgeprägte Terrassenstufe liegt, die Vermutung zu, daß der Wall die östliche Begrenzung der Nordoase zu Beginn der bekannten Bewässerung (Bau N 4) darstellt. Der größte Teil dieser Oasenfläche scheint von Anfang bis Ende kontinuierlich bewirtschaftet worden zu sein, während das überschüssige Wasser zuerst weiter auf die Südoase oder ins Wadi und erst später zusätzlich auf östlich gelegene Areale geleitet wurde.
- Die Terrassenstufen in Nord-Süd-Richtung konnten während der für die Erstellung der Schnitte 1 bis 4 notwendigen Geländebegehung, soweit noch sichtbar, kartiert werden (vgl. Abb. 36–39).
- Die rekonstruierten Terrassenoberflächen wurden in gleicher Höhenlage wie der nächstgelegene höhere Geländeknick angenommen. Die daraus resultierenden Abbildungen zeigen Schnitte durch die Terrassenanlage, wobei der Unterschied zwischen den verschiedenen Niveaus im zentralen Teil des Hauptverteilersystems etwa 120–140 cm beträgt. Größere Sprunghöhen treten im nördlichen Ġufayna-System und an der die Systeme trennenden Geländestufe auf. Die extremen Steilwände an den Wadis sind erst durch Erosion nach der Aufgabe der Bewässerung entstanden.
- Da während der letzten Betriebsperiode I die Zentralflächen des Hauptverteilersystems wahrscheinlich gleichmäßig bewässert wurden, kann man die Sedimentmächtigkeiten dieser Periode in die Abbildungen übertragen. Gleiches kann mit den Mächtigkeiten der älteren Perioden II–IV durchgeführt werden.

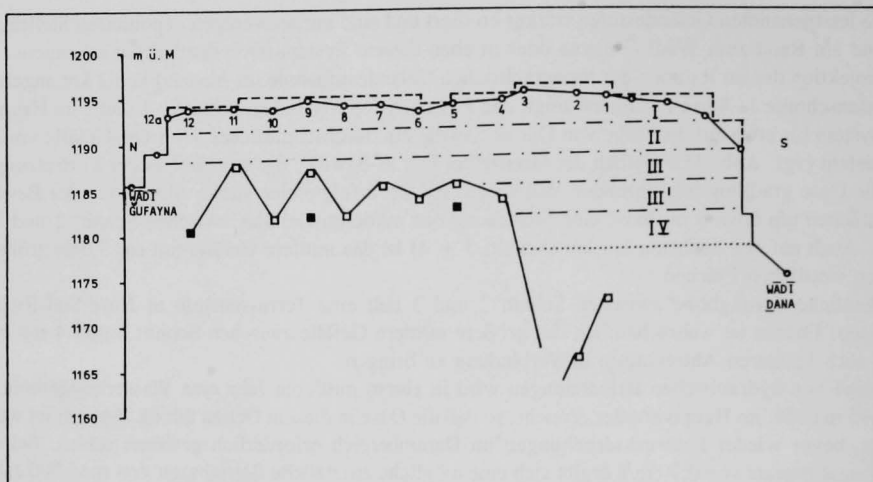


Abb. 36. Sedimentmächtigkeiten der Betriebsperioden I-IV im Schnitt 1.

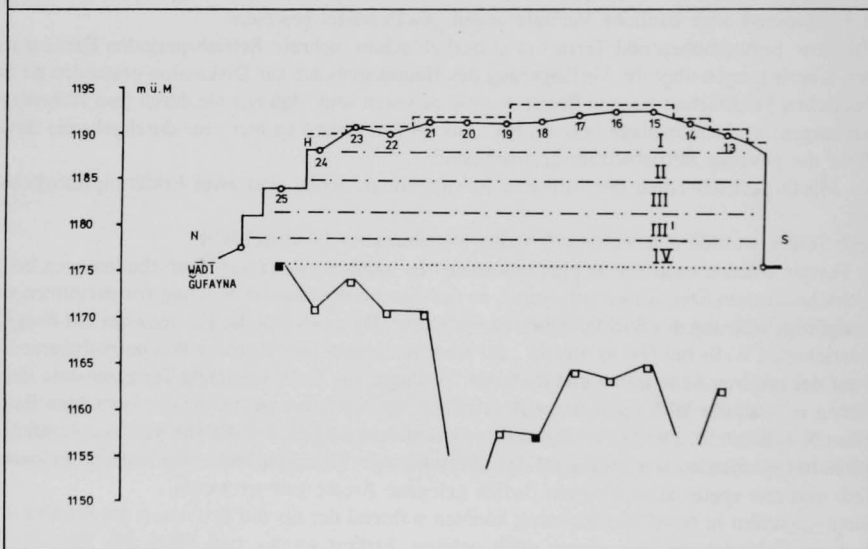
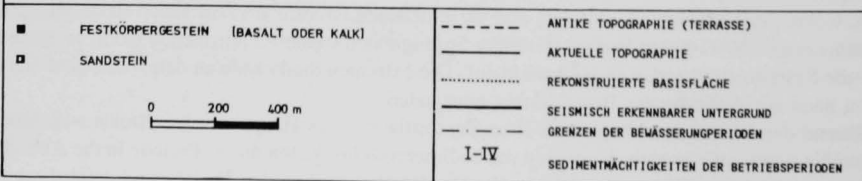
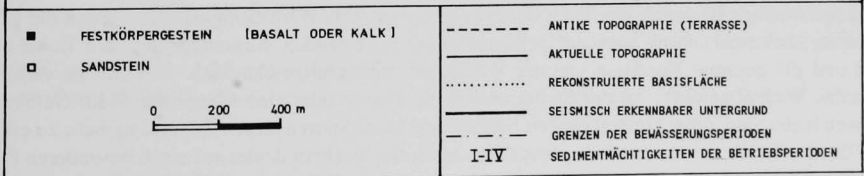
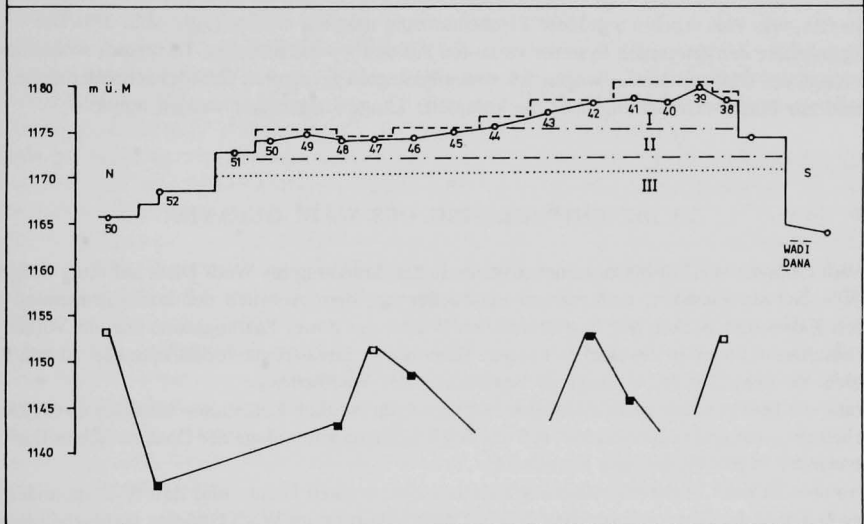
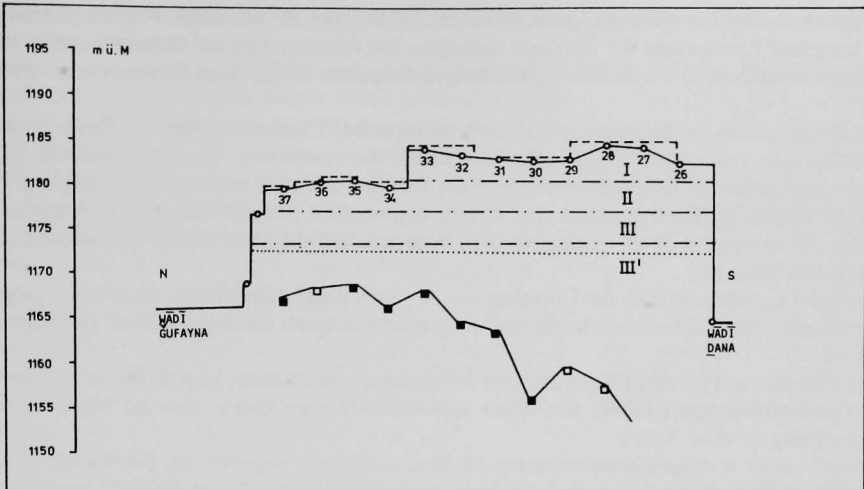


Abb. 37. Sedimentmächtigkeiten der Betriebsperioden I-IV im Schnitt 2.





Diese hypothetischen Darstellungen lassen erkennen, daß lediglich die westlichen Flächen (Schnitt 1 und 2) die komplette Entwicklung der Nordoase aufzeigen. Die östlichen Gebiete (Schnitt 3 und 4) wurden nach dieser Hypothese erst wesentlich später und nacheinander in das Bewässerungssystem miteinbezogen.

Überraschend ist, daß die Basisflächen der der Betriebsperiode I zuzurechnenden Sedimente immer mit bestehenden oder rekonstruierten Terrassenoberflächen übereinstimmen. Das läßt vermuten, daß die Bewässerungsflächen des Hauptverteilersystems der Periode I aus einer relativ gleichförmigen größeren Fläche der Periode II hervorgegangen sind, indem man nördlich und südlich gelegene Areale aus der Bewässerung herausnahm. Das würde aber auch bedeuten, daß die kleinräumige Terrassenanlage der Nordoase sehr jung ist.

Entsprechend ist wahrscheinlich der Übergang von N 3 zu N 2 zu interpretieren. Auch hier wurden von einer größeren Grundfläche randliche Gebiete ausgespart und damit die Bildung einer Terrassenanlage bevorzugt.

Während die älteren Perioden IV und III noch den gesamten von Norden nach Süden möglichen westlichen Oasenteil bewässert haben, trat später eine verstärkt nach Osten, also auf Märib gerichtete Flächennutzung an diese Stelle.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang der Niveaueausgleich zwischen den Feldflächen des nördlichen Ġufayna(h)- und des Hauptverteilersystems. Während im Schnitt 2 noch eine Höhendifferenz von 10 m vorliegt, schwindet diese schon im Schnitt 3 auf nur noch ca. 5 m. Damit ist das Niveau der nicht in das letzte Hauptverteilerbewässerungsnetz integrierten Nordoase erreicht und dem Ġufayna-System angegliedert, was eine erheblich größere Flächennutzung möglich machte (vgl. Abb. 38). Die wichtigsten Hauptkanäle der getrennten Systeme verlaufen auf den jeweils höchsten Terrassen, wobei der südlichste Kanal des Ġufayna-Netzes wegen des systembedingten geringeren Gefälles schneller aufsedimentierte und zur Funktionserhaltung über die komplette Länge ausgeräumt werden mußte.

3.3 DIE ENTWICKLUNG DES WĀDĪ ĠUFAYNA

Das Wādī Ġufayna verläuft bis zu seiner ursprünglichen Mündung ins Wādī Dana auf einer tiefgreifenden, NW-SO streichenden, tektonischen Schwächezone, dem Abbruch der hochaufragenden mesozoischen Kalke zum Becken der innerarabischen Wüste. An dieser Störungszone stiegen Vulkane auf, deren basaltische Laven in das Becken flossen. Einer dieser Lavaströme verläuft parallel zu den Kalken und bildet die etwa 3 m hohe nördliche Begrenzung des Wadibettes.

Aufgrund der beiden hohen natürlichen Uferbegrenzungen (südlich Kalkstein – nördlich Lava) kann mit Sicherheit davon ausgegangen werden, daß das Wādī Ġufayna vor Anlage der Oase zwischen Damm und Hauptverteiler in das Wādī Dana einmündete.

Zu vermuten ist der Ort der Einmündung zwischen dem antiken Damm und Bau N 4, da anderenfalls die Bewässerung der Nordoase von Bau N 4 bei Wasserführung im Wādī Ġufayna wahrscheinlich stark gestört, wenn nicht gar unterbunden worden wäre (vgl. Taf. 10).

Mit der Einführung der Anlagekonzeption „Absperrramm – Hauptkanal – Hauptverteiler“ zu Beginn der Betriebsperiode III wurde das Wādī Ġufayna gekreuzt. Das Wādī Ġufayna stellte somit die ständige Gefahr dar, bei einer, wenn auch nur gelegentlich zu erwartenden Wasserführung, den Kanal zu zerstören und die gesamte Nordoase von der Wasserversorgung abzuschneiden. Um dies zu verhindern, wurde das Wadi abgeleitet. An der Stelle, an der ein Damm oder eine Mauer das Wādī Ġufayna verschlossen hatte, sind außer einigen großen Kalksteinen keine Spuren einer Absperrung mehr zu erkennen (Taf. 9b). Lediglich eine in den Fels gemeißelte sabäische Inschrift deutet auf einen besonderen Ort hin. Obwohl, ausgehend von der heutigen Situation, etwa 3 m Höhenunterschied zu überwinden waren,

beweisen bis zu 10 cm große Kalkgerölle in einer Rinne im Basalt die Existenz dieser Überleitung des Wassers über die Lava (Taf. 9c).

In dem neuen Bett wurde der Abfluß zwischen zwei Lavaströmen endgültig aus dem Bereich des gefährdeten Hauptkanals geleitet. Das Wasser wurde zumindest anfänglich zur Bewässerung der während der Periode III in diesem Gebiet neu erschlossenen Oasenflächen genutzt. Als Beweis für diese Behauptung dient das Profil P 3 (vgl. Taf. 7 b), in dem an der Basis eine Wechsellagerung von feinkörnigen Oasensedimenten und fluviatil umlagerten basaltischen Kiesen aufgeschlossen ist. Nachdem sich herausgestellt hatte, daß die von dem Bewässerungswasser des Wādī Ġufayna abgelagerten Gerölle den Aufbau einer für die Bewirtschaftung hinreichend dicken Schwemmlöschicht verhinderten, wurde das Wādī Ġufayna vermutlich an der Oase vorbeigeleitet oder in Becken eingestaut, während die Bewässerung der Nordoase nur noch über den Hauptverteiler erfolgte.

Die Sedimente der schon von BRUNNER⁹⁰ beschriebenen Becken bestehen aus ungestörten, horizontal feingeschichteten Ablagerungen über einer von Lavagrus gebildeten Basis. Lediglich die obersten 70 cm, der etwa 3 m mächtigen, bis in eine Höhe von 1188,80 m ü. M. reichenden Sedimente zeigen Bearbeitungsspuren, was eine späte landwirtschaftliche Nutzung belegt. Erhalten ist die gesamte Abfolge, weil eine 30 cm dicke Schicht aus umgelagertem basaltischem Grus am Top die Erosion verhindert hat. Die Herkunft der Gerölle und Kiese ist ungeklärt. Es können sowohl Ablagerungen des Wādī Ġufayna im aufsedimentierten Becken, als auch der mit Beginn der Periode I ins Wādī Ġufayna verlegten Hochwasserabflüsse sein.

Die Kontrolle über die Abflüsse des Wādī Ġufayna ermöglichte zusätzlich die Anlage von landwirtschaftlichen Nutzflächen im Bereich des ursprünglichen Flußbettes. 500 m nördlich des Nordbaus ist auf dem Sediment (Oasenbasis 1192,13 m ü. M.) in 1194,30 m ü. M. noch das Fundament eines Wasserverteilers erhalten. Der anschließende Kanalrest läßt durch seine Ausrichtung auf eine Zugehörigkeit zum orthogonalen Kanalnetz des Hauptverteilersystems schließen. Seit der Verlegung der Hochwasserabflüsse ins Wādī Ġufayna waren diese Flächen jedoch vom Hauptverteiler abgeschnitten.

Mit Hilfe der Höhenlage des Verteilerfundaments kann eine Aussage über die Periodenzugehörigkeit des Gebietes und über den frühestmöglichen Zeitpunkt des Baus der Hochwasserentlastung am Nordbau gemacht werden. Die Sedimenthöhe von 1194,30 m ü. M. läßt Rückschlüsse auf die notwendige Wasserspiegelhöhe im Stauraum zu. Die Entfernung des Sedimentrestes vom Hauptverteiler beträgt genau wie die Distanz vom Nordbau zum Hauptverteiler 1200 m. Legt man ein mittleres Gefälle von 1‰ im sekundären Kanalnetz, sowie die ermittelten 1,8‰ im Hauptkanal zu Grunde, so benötigt man eine Wasserspiegelhöhe von mindestens 1197,50 m ü. M. am Nordbau, um diese Areale mit freiem Gefälle zu bewässern. Andererseits konnten diese Flächen erst ab einer Wasserspiegelhöhe von 1195,30 m ü. M. im Stauraum erreicht werden, so daß sich diese Sedimente eindeutig einem jüngeren Stadium der Periode II bzw. einem älteren Stadium der Periode I zuordnen lassen. Gleichzeitig wird auch deutlich, daß Hochwasserabflüsse in allen früheren Perioden zurück ins Wādī Dana geführt worden sein müssen.

Mit dem Bau der nach Norden gerichteten Hochwasserentlastung und der gleichzeitigen Abtrennung der nördlichen Bewässerungsflächen wurde auch die bislang notwendige Ableitung am Oberlauf des Wādī Ġufayna überflüssig. Der Fluß suchte sich sein altes Bett und wurde wieder zu einer potentiellen Gefahr für den Hauptkanal.

Um Schaden abzuwenden, wurde das Wadi mit Hilfe einer Ablenkmauer (Oberkante 1191,30 m ü. M.) in die Richtung der Hochwasserabflüsse geleitet. Diese Zusammenlegung hatte eine regelmäßigere Wasserführung zur Folge. Da es nahe lag, dieses Wasser an anderer Stelle zu nutzen, erfolgte später die Errichtung der Anlage „al-Mabnā“ im Wādī Ġufayna.

Zwischen dem Bau der Hochwasserentlastung der Periode I und dem Bau von „al-Mabnā“ liegt aller-

dings eine größere Zeitspanne (vgl. Kap. 3.2), während der der Abfluß in mehreren Abschnitten (N 1/1 bis N 1/4) Erosionsschäden an der Oase verursachte, Bereiche am Rande abtrennte und sich den heutigen Wadiverlauf schuf. Diese Tatsache deutet darauf hin, daß erst derartig negative Auswirkungen die Sabäer zum Bau der Bewässerungsanlage „al-Mabnā“ veranlaßt haben können.

Im Prinzip sind mit der Errichtung von Ġufayna drei Wirkungsbereiche geschaffen worden:

1. Verringerung der Erosion randlicher Oasengebiete
2. Wirtschaftliche Nutzung der Hochwasserspitzen auf den Bewässerungsgebieten um und östlich von Mārib
3. Die planmäßige Nutzung des Abflusses, der über die Hochwasserentlastung des Nordbaus geleitet wurde.

Mit diesem Steuerverfahren wurden mittels dreier Hauptkanäle die nordöstlichen Teile der Nordoase, das Gebiet bis zur westlichen Stadtmauer von Mārib und die östlichen Oasenteile bis zum heutigen Ort Ĥuṣūn am Ostrand der Oase versorgt (vgl. Taf. 1). Aufgrund der besonderen Anlage des Bauwerks in der schmalen Rinne der Hochwasserentlastung sind Stauraumsedimente, falls überhaupt jemals welche abgelagert wurden, natürlich schon lange wieder erodiert. Die zwischen den Mauern des Bauwerks erhaltenen Sedimentreste müssen, da sie einen Kanal aufweisen (Sohlhöhe 1183,74 m ü. M.), der von einer Mauer fast rechtwinklig abgeschnitten wird, zu den älteren Ablagerungen des Hauptverteilersystems gezählt werden.

3.4 DATIERUNG UND BETRIEBSDAUER DER SABÄISCHEN WASSERKULTUR

Nach Abschluß der Untersuchungen können die Sedimente unter Berücksichtigung folgender Voraussetzungen einer Zeitskala zugeordnet werden (vgl. Abb. 40).

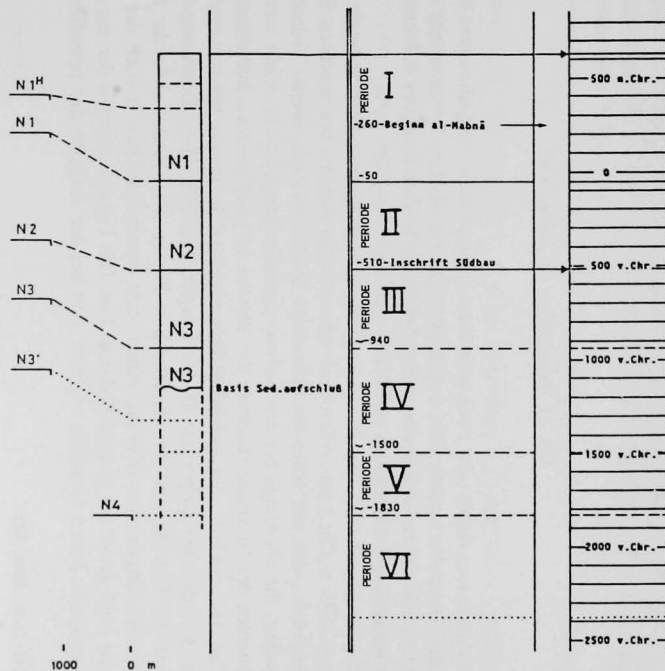
- Die Umrechnung der Sedimentmächtigkeiten, die den verschiedenen Betriebsperioden zugeordnet werden, in Zeitabstände erfolgt mit der Sedimentationsrate von 7 mm/a, die aufgrund der verschiedenen Bestimmungsverfahren für den westlichen Teil des Hauptverteilersystems der Nordoase abgeleitet wurde und auch für das Kerngebiet der Südoase einen hohen Plausibilitätsgrad besitzt (vgl. Kap. 2.1, 2.5.5, 2.7 und 3.2).
- Das jeweils mächtigere Sedimentpaket während einer Betriebsperiode wird als Hinweis auf eine Dominanz des zugehörigen Oasenteils angesehen; hier wird eine kontinuierliche Bewässerung während der gesamten Periode angenommen. Veränderungen an den Bauwerken wurden erst dann durchgeführt, wenn auf diesem wichtigeren Oasenteil keine ausreichende Bewässerungsmöglichkeit mehr bestand. Für das dünnere Paket des anderen Oasenteils kann eine vorzeitige Aufgabe des Bewässerungsbetriebes angenommen werden; in Frage kommt auch ein nicht kontinuierlicher Bewässerungsbetrieb, d. h. das zur Verfügung stehende Wasserdargebot reichte für die Bewässerung der gesamten Fläche des Oasenteils nicht aus und wurde jeweils unterschiedlichen Feldern zugeführt, so daß an den Aufnahmeorten der Sedimentprofile von den Einzelschichten keine ununterbrochene Folge repräsentiert wird.
- Die den Beginn einer Betriebsperiode kennzeichnenden Um- oder Neubauarbeiten schlagen sich durch entsprechende Veränderungen in den Sedimentprofilen nieder. Diese Profil-Veränderungen müssen in den Sedimenten beider Oasenteile sichtbar sein, wenn die Ableitungsanlagen ein sich gegenseitig bedingendes Funktionssystem bilden. Das beste Beispiel stellen die jüngsten Anlagen (Nordbau N 1 und Südbau S 1 mit dem Absperrdamm) dar.
- Die Gesamt-Betriebsdauer der Oasen ergibt sich aus der Addition der Betriebszeiten der jeweils dominierenden Oasenteile. Dabei wird angenommen, daß die Bewässerung direkt nach Abschluß der baulichen Veränderungen wieder aufgenommen wurde.
- Um die sich ergebende relative Zeitskala sicher einordnen zu können, ist es notwendig, das absolute

NORDOASE

ABLEITUNGS-
BAUWERKE

SEDIMENTE

ZEIT



SÜDOASE

SEDIMENTE:

ABLEITUNGSBAUWERKE

Aufgabe der syst. Bewässerung Südoase (Westteil.)

geringere Schichtmächtigkeit; mögl. Ursachen: Ausfallzeit oder extensive Bewässerung

geringere Schichtmächtigkeit; s.o.

Oasenbasis

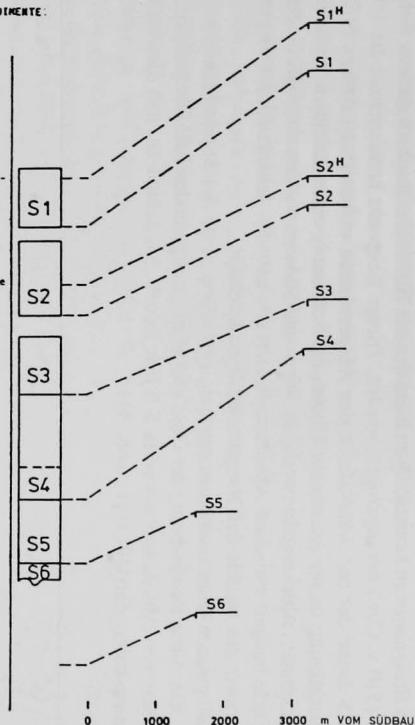


Abb. 40. Zuordnung der Bauwerke und Sedimente (Die Abbildung und die Einbindung der Bauwerke wurde mit freundlicher Unterstützung von Dipl.-Ing. M. Schaloske angefertigt, der in dem Forschungsvorhaben für die Bearbeitung der Bewässerungsanlagen zuständig war.)

Datum eines Ereignisses zu kennen. Dazu kann der mit Hilfe einer Inschrift datierte Felddurchschnitt am Südbau (510 v. Chr.) herangezogen werden. Dieser Zeitpunkt kennzeichnet die Inbetriebnahme der Anlage S 2 und der mit dieser durch den Absperrdamm verbundenen Anlage N 2.

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen können die Sedimente einer absoluten Zeitskala zugeordnet werden. Die bekannten Ableitungsbauwerke zu Nord- und Südoase wurden ebenfalls eingetragen. Dabei wurden die Entfernungen zwischen Ableitungsbauwerken und den jeweils nächstgelegenen Bewässerungsflächen sowie das Gefälle der Hauptkanäle berücksichtigt.

Die sedimentologischen Untersuchungen ergeben, daß schon Mitte des 3. vorchristlichen Jahrtausends die geregelte, künstliche Bewässerung der Oase von Märib stattgefunden hat. Die perfekte Konstruktion des ältesten bekannten Ableitungsbauwerkes S 6 läßt jedoch den Schluß zu, daß dies nicht den Beginn der Bewässerungskultur darstellt (vgl. Abb. 41).

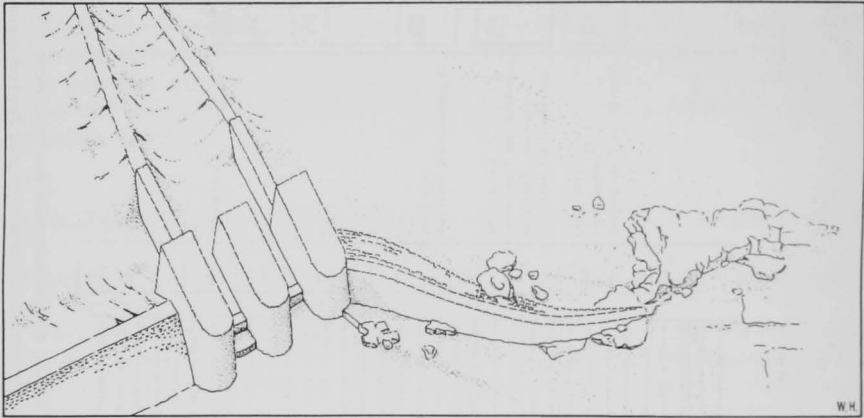


Abb. 41 Prinzipskizze der Anlage S 6⁹¹.

So ist also mit mindestens einem oder zwei noch älteren, vermutlich von Sedimenten bedeckten, Bauwerken zu rechnen. Diese Vermutung läßt den Beginn der künstlichen Bewässerung noch weiter in die Vergangenheit zurückreichen, so daß sehr wahrscheinlich schon am Ende des 4. Jahrtausends v. Chr. von der Bewässerungskultur auf der Oase von Märib gesprochen werden kann.

Die Sedimentationspakete und die Bauwerke zeigen eine Gesamt-Betriebsdauer von 3000 Jahren (2370 v. Chr. – 575 n. Chr.) an. Allerdings stammen die ältesten untersuchten Sedimente aus dem 19. Jh. v. Chr., d. h., daß mit Hilfe der Bauanlage S 6 entferntere, weiter östlich gelegene Flächen bewässert wurden, die allerdings bei den Sedimentuntersuchungen nicht erfaßt werden konnten.

Bei den Sedimenten der Nordoase stammen die ältesten aufgeschlossenen Sedimente etwa aus der Zeit um 1150 v. Chr. Die mit Hilfe der Anlage N 4 abgelagerten Sedimente konnten an keiner Stelle untersucht werden. Für die Betriebsperiode III bis I ergibt sich eine klare Dominanz der Nordoase. Die Sedimentpakete der Südoase sind jeweils erheblich dünner. Dies deutet entweder auf jahrzehntelange Pausen im Bewässerungsbetrieb oder auf einen nicht kontinuierlichen Betrieb der im Sedimentprofil erfaßten Fläche (und damit der ganzen Südoase) hin. Die Untersuchungen der zur Südoase führenden Hauptzuleitungskanäle haben ebenfalls ergeben, daß bei der Aufgabe der betroffenen Bauwerke S 3,

⁹¹ Herberg a.O. (s. o. Anm. 62).

S 2 und S 1 noch eine ausreichende Höhe zu einer Fortsetzung des Bewässerungsbetriebes vorhanden war.

Über die mögliche Dominanz einzelner Oasenteile während der älteren Betriebsperioden IV bis VI ist keine Aussage möglich, da die entsprechenden Sedimente auf der Nordoase nicht aufgeschlossen sind. Es sind dabei grundsätzlich zwei Annahmen möglich. Während der Periode IV bis VI besaß die Südoase im Bewässerungsbetrieb eine größere Wertigkeit; die Überreste der Ableitungsanlage S 6 und S 5 weisen deutlich darauf hin, daß bereits zu Beginn des 2. Jahrtausends v. Chr. ein planmäßiger Bewässerungsbetrieb in großem Stil durchgeführt wurde. Das würde auch bedeuten, daß zum Zeitpunkt des Übergangs von Periode IV zu Periode III eine Verlagerung des landwirtschaftlichen Mittelpunktes von der Süd- zur Nordoase erfolgte.

Ebenso vorstellbar ist, daß während der älteren Betriebsperioden (IV bis VI) beide Oasenteile (Nord- und Südoase) eine gleichrangige Bedeutung besaßen. Eine Bevorzugung einzelner Teilflächen, die sich in den stärkeren Sedimentpaketen äußert, war bei der damaligen, wesentlich kleineren Gesamt-Bewässerungsfläche nicht erforderlich. Erst durch die im Laufe der Entwicklung größer werdende Fläche mußte ein Oasenteil bevorzugt werden, da das Wasserdargebot dann nicht immer zur Versorgung aller Felder ausreichte.

Aus dem Schema, respektive aus der Höhen-Abfolge der Bauwerke wird deutlich, daß die Anlage N 3 (Schwellenhöhe H 1189,8 m ü. M.) wahrscheinlich nicht direkt der Anlage N 4 (Schwellenhöhe H = 1181,6 m ü. M.) folgte.

Die ungewöhnlich große Höhendifferenz kann dadurch ausgeglichen worden sein, daß während der Betriebsperiode IV die Anlage N 4 mit einer um etwa 2–2,5 m erhöhten Schwelle betrieben wurde. Die genauere Untersuchung von N 4⁹² läßt allerdings Zweifel an dieser Erklärung aufkommen. Viel wahrscheinlicher ist die Existenz eines weiteren Ableitungsbauwerkes N 3', welches während der Periode IV gemeinsam mit S 4 betrieben wurde. Als Zeitpunkt für die Inbetriebnahme von N 3' kommt also der Anfang der Periode IV in Frage. Möglich ist aber auch, daß das Bauwerk N 3' mit einem Ereignis, auf welches die Veränderungen in dem zu S 4 gehörenden Sedimentpaket hinweisen, während der Periode IV in Verbindung zu bringen ist.

3.5 URSACHEN FÜR DEN VERFALL DER ANTIKEN WASSERKULTUR MĀRIB

Die Forschungsergebnisse lassen konkrete Aussagen darüber zu, ob der endgültige Verfall der antiken Oasenkultur Mārib auf die (nicht mehr beherrschbaren) Einflüsse natürlicher Ressourcen oder auf technologisch bedingte Probleme ursächlich zurückzuführen ist oder ob mittelbare, anthropogene Einflüsse die Ursache für den Verfall der Bewässerungskultur waren.

So können irreparable Veränderungen oder Schäden im Funktionsablauf (Ankunft des Sayl – Aufstau mit Hilfe des Dammes – Ableitung über die Bauwerke auf die Oase – Bewässerung der Felder und Aufsedimentation – Anbau der Kulturpflanzen) durch

- a) systemimmanente Prozesse
 - b) plötzlich auftretende äußere geogene Ereignisse (z. B. Erdbeben)
 - c) anthropogen bedingte organisatorische Fehler
- erfolgen.

Zu a)

Der Ausfall einer Regenzeit und das Ausbleiben des Sayl bedeuteten für die Sabäer gleichzeitig den Verlust eines Großteils der Ernte und damit Einschränkungen des Nahrungsmittelangebots. Diese Verknappung war jedoch sicherlich nicht die Norm.

In der Regel können, auf Grund ähnlicher klimatischer Voraussetzungen, damals wie heute zwei Regenzeiten angenommen werden, so daß die Aufgabe der Oase wegen mangelnden Wasserdargebotes unwahrscheinlich ist.

Alle wasserwirtschaftlichen und wasserbaulichen Planungen und Bauwerksgestaltungen oder -veränderungen wurden während der gesamten Zeit, also auch in der letzten Bewässerungsperiode, durch die bewässerungs- und sedimentationsbedingte, topographische Erhöhung der Nordoase notwendig.

Damit stellt sich die Frage, ob jene Erhöhung letztendlich Stau-Bauwerksdimensionen erforderte, die in Anbetracht der hier wirksamen naturbedingten Einflüsse und der zu dieser Zeit bestehenden technologischen Möglichkeiten nicht mehr realisierbar oder erhaltbar waren.

Betrachtet man diese Fragestellung allein aus naturwissenschaftlich-technologischer Sicht, so muß man das möglicherweise für den Verfall ursächliche Objekt, das Staubauwerk (-Damm) Mārib, in den Betrachtungsmittelpunkt stellen, weil nur hier eine solche Problematik relevant werden konnte.

Die zu untersuchende Fragestellung gliedert sich somit in zwei Bereiche:

- (1) War das Staubauwerk (-Damm) Mārib der Periode I langfristig zu erhalten, um einen zielgerechten Bewässerungsbetrieb zu gewährleisten oder
- (2) war aufgrund der Oasenerhöhung (Aufsedimentierung) eine mit technologischen Problemen behaftete Erhöhung des Staubauwerkes notwendig, die zur Einstellung des Bewässerungsbetriebes und damit zur Aufgabe der Oase führte.

Zu (1)

Es kann angenommen werden, daß die massiven Konstruktionen des Nord- und Südbaus keine relevanten Probleme hinsichtlich ihrer funktionalen Erhaltung aufgeworfen haben.

Man darf aufgrund einer Analyse der heute noch vorhandenen Bauwerkssubstanzen annehmen⁹³, daß an den Massivbauwerken nicht nur funktionelle, sondern auch zerstörungsbedingte Unterhaltungs- und Instandsetzungsarbeiten vorgenommen worden sind. Solche Zerstörungen haben jedoch nie – und das zeigt auch der Zustand der rezent vorhandenen Überreste – zu existenzbedrohenden Problemen geführt. Man kann sogar feststellen, daß der Nord- und der Südbau heute noch funktionsfähig sind, sieht man von unwesentlichen, wahrscheinlich anthropogen verursachten Details ab.

Die historischen Versagungsursachen des Funktionssystems „Staubauwerk Mārib“ der letzten Bewässerungsperiode I beziehen sich also ausschließlich auf den Bereich des großen Erd-Absperrdamms.

Der Dammbau als einfache Erdschüttung ohne besondere Dichtung mit einer Permeabilität von 5 cm/d mag auch zu hydraulischen Grundbrüchen geführt haben. Der wahrscheinlich auch durch eine Steinstückung befestigte luftseitige Böschungsfuß, die Dammhöhe und die hohe Aufsedimentierung im dammnahen Stauraumbereich lassen die Wahrscheinlichkeit eines solchen Grundbruches jedoch als gering erscheinen.

Problematischer sind die Sicker- (Potential-)Strömungen im Bereich der baukonstruktiven Verbindung Südbau – Erddamm. Man darf als sicher annehmen, daß hier Abdichtungsprobleme bestanden haben (z. B. senkrecht verlaufende Felsriß-Fuge im Tosbecken des Südbaus, vgl. Taf. 2b). Dieses Phänomen

93 J. Schmidt, Baugeschichtliche Untersuchungen an den Bauanlagen des großen Dammes von Marib, in

Archäologische Berichte aus dem Yemen I, Mainz 1982, S. 9–20.

der Sickerströmungen spiegelt sich vermutlich in der bei GLASER⁹⁴ überlieferten Sage von der am Dammschluß nagenden Ratte wider.

Dennoch sind Dammbrüche durch Diskordanzen in den Stauraumsedimenten dokumentiert. Hierbei handelt es sich aller Wahrscheinlichkeit nach um die Auswirkungen von Hochwasserereignissen.

All diese Problembereiche sowie die damit möglicherweise verbundenen Dammbrüche haben jedoch zu keiner Zeit die Existenz des Funktionssystems in Frage stellen können. Es war auch in dieser Spätperiode zweifelsohne kein technisches und logisches Problem, derartige Schäden zu sanieren. Diesbezügliche Erfahrungen haben in reichem Maße bestanden. Die Probleme der Erhaltung des Staubauwerks Märib und damit die Aufrechterhaltung der Bewässerungskultur der Periode I waren also sicherlich nicht die Ursache für die Aufgabe und den Verfall der Bewässerungskultur um Märib.

Zu (2)

Auch die sukzessive Aufhöhung der Nordoase und die damit verbundenen technologisch-wasserbaulichen Konsequenzen können nicht als Ursache für die Aufgabe der Bewässerungskultur gelten. Auf Grund der hydraulischen Bedingungen hätte der Bewässerungsbetrieb der Nordoase noch etwa 300 Jahre länger aufrechterhalten werden können, ohne das Hauptstaubauwerk erhöhen oder verändern zu müssen. Das vorhandene Wasserspiegelgefälle vom Nordbau bis zum Hauptverteilerbauwerk auf der Nordoase hätte ohne hydraulisch relevante Bewässerungs- (Abfluß-)Einbuße auf 1,2‰ aufgebaut werden können. Es wäre also zur Bewässerungsfortsetzung lediglich eine Erhöhung des Hauptverteilerbauwerkes und des Hauptzuleitungskanals notwendig gewesen.

Obwohl die Bewässerungsmethoden im Laufe der Zeit nicht verändert wurden, unterliegen die Korngrößenzusammensetzungen der mitgeführten Sedimente großen Schwankungen. So sind auf der generell grobkörnigen Südoase (die starke Sandschüttung wurde vermutlich durch den Standort des Südbaus unmittelbar am Stromstrich begünstigt) Sandgehalte von 50–60% am Ende einer Bewässerungsperiode üblich. Derartige Sedimente besitzen nur noch einen pflanzennutzbaren Wassergehalt von 8–10% oder 80–100 mm pro 1 m Bodentiefe.

Demgegenüber stehen die lehmigen und sandigen Schluffe der beginnenden und mittleren Perioden, mit einem pflanzennutzbaren Wassergehalt von 18–20%. Da Kulturpflanzen mindestens 300 mm Wasser pro Vegetationsperiode benötigen, wird aus den oben genannten Zahlen ersichtlich, daß die Pflanzen am Ende einer Periode auf der Südoase kaum Ertrag brachten bzw. verdorrten, obwohl sich am Bewässerungsverfahren nichts geändert hatte.

In den frühen Perioden VI bis III besaßen diese abschließenden Ablagerungen nur eine relativ geringe Mächtigkeit. Die jeweils folgende Erhöhung des Dammes und der Ableitungsbauwerke verursachte eine schnelle Rückkehr zu normalen Verhältnissen. Dies änderte sich während der Periode II. Dort ist die oberste Bank mindestens 140 cm stark und weist einen Sandgehalt von 56% auf. Trotz des damit verbundenen geringen pflanzenverfügbaren Wassergehaltes und der negativen Auswirkungen auf den Pflanzenwuchs ist die gesamte Bank ackerbaulich bearbeitet.

Die zwangsläufig nur geringen Erträge, die sich ungeachtet der enormen Arbeit einstellen, könnten ein Grund für die wesentlich frühere Aufgabe der Südoase (während der Periode II) im Vergleich zur Nordoase gewesen sein. Denn auf der anderen Wadiseite waren bei noch feinkörnigeren Sedimenten und höherer nutzbarer Feldkapazität mit gleichem Arbeitsaufwand gute bis sehr gute Ernten zu erzielen. Mit der Erstellung des letzten Dammes und der zugehörigen Ableitungsbauwerke wurde die Südoase wieder bewässert. Auf anfängliche Schluffablagerungen (IU) folgten schon nach 20 cm (rund 30 Jahren) wieder stark sandige Sedimente, deren Sandgehalt von 50 über 72 auf 87% stiegen. Generell sind Böden mit hohem Sandgehalt, wie in diesem Fall über 85%, landwirtschaftlich zu nutzen. Jedoch bedarf ein

94 Glaser a. O. (s. o. Anm. 54).

fast reiner Sandboden wegen seiner für Pflanzen geringen nutzbaren Speicherfeuchte (6%) einer regelmäßigen Bewässerung.

Diese Bedingung ist jedoch in Märib nicht zu erfüllen. Dort muß mit einem einmaligen Einstau eine für eine Vegetationsperiode der Pflanzen ausreichende Wassermenge eingebracht werden. Selbst eine Erhöhung der aufgetragenen Wassermenge verbessert die Situation nicht, da der geringe nutzbare Porenraum schnell gefüllt ist und der überschüssige Rest, der nicht entgegen der Schwerkraft gehalten werden kann, innerhalb kurzer Zeit als Sickerwasser dem Grundwasser zustrebt.

Als Folge vertrocknen die bislang angebauten Kulturpflanzen trotz einer ausreichend erscheinenden Bewässerungsgabe und eine befriedigende Ernte kommt nicht mehr zustande. Dieses Phänomen wird letztlich zur vorzeitigen Aufgabe der westlichen Südoase geführt haben, da der Zusammenhang zwischen Sedimentschüttung und Feldkapazität von den Betreibern wahrscheinlich nicht erkannt wurde.

Auch die ca. 300 Jahre länger kultivierte Nordoase zeigt im höchsten Niveau ähnliche Symptome. Die letzten im Hauptverteiler der Periode I abgelagerten Sedimente, bei denen Erosion weitgehend ausgeschlossen werden kann, besitzen eine Mächtigkeit von 110 cm und einen Sandanteil von rund 70%. Da im Hauptverteiler keine Sedimentrückhaltevorrichtungen bekannt sind, kann nach heutigem Erkenntnisstand vorausgesetzt werden, daß die Sedimentfracht des Hauptkanals nahezu unverändert durch den Hauptverteiler auf die Feldflächen transportiert wurde.

Daher muß auch für die Nordoase davon ausgegangen werden, daß letztlich trotz aller Bemühungen keine effiziente Landwirtschaft mehr möglich war. Obwohl mit den bestehenden Bauwerken die Fortsetzung der Bewässerung um rund 300 weitere Jahre technisch realisierbar gewesen wäre, hätte die Oase aufgrund der Sedimentzusammensetzung keinen Ertrag mehr erwirtschaftet, so daß die Aufgabe nur konsequent war. Die Sedimentablagerungen, die in frühester Zeit die Grundlage der Bewässerungskultur in der unfruchtbaren Landschaft bildeten und eine geplante ackerbauliche Nutzung erst ermöglichten, führten also auch zur Aufgabe.

Das bedeutet aber gleichzeitig, daß alle anderen Erklärungen für den Niedergang des sabäischen Staates wie z. B. Dammbruch, fehlende Staatsfinanzen o. ä. nur in Verbindung mit dem natürlichen Versagen der beiden Oasenhälften zu sehen sind.

Die Frage, warum sich die Korngrößenverteilung der abgelagerten Sedimente im Laufe der Zeit langsam aber stetig von der Schluff- in die Sandfraktion verschiebt, kann nur mit Vorgängen im Einzugsgebiet erklärt werden, da sich die Situation vor Ort nicht gewandelt hat. Vermutlich ist die Ursache in einer stärkeren Hebung des Yemenitischen Hochlandes zu sehen. Denkbar ist auch eine zunehmende Aridität des Klimas, was die physikalische Verwitterung begünstigte und den Einfluß der chemischen Verwitterung zurückdrängte.

Für die Zeit um 3500 v. Chr. werden im gesamten nordafrikanischen Raum und im Orient wesentlich feuchtere Klimabedingungen angenommen (vgl. Kap. 1.4.4.2), die kontinuierlich in das aktuelle Klima übergingen.

In beiden Fällen (Hebung und Ariditätszunahme) entsteht mehr grobes Material, das vom Wadi abtransportiert wird und den bei der Dammerhöhung neu geschaffenen Retentionsraum beschleunigt auffüllt, sowie nach der Ablagerung auf den Oasen zur Unfruchtbarkeit des Bodens trotz regelmäßiger aber lediglich einmaliger Bewässerung führt.

Zu b)

Der Erddamm, dessen Ausrichtung alle tektonisch aktiven Linien schneidet, war mit großer Sicherheit der Gefahr eines Dammbruchs als Folge eines Erdbebens ausgesetzt. Die Wahrscheinlichkeit eines Dammbruchs bei einem Hochwasserereignis war jedoch wesentlich größer. Diskordanzen in den Stauraumsedimenten und Inschriften beweisen, daß Dammbrüche durch Hochwasser den Betreibern genauso wie die Beseitigung der Schäden vertraut gewesen waren. Daher können Dammbrüche keineswegs als alleinige Gründe für die Aufgabe der Oase gelten.

Zu c)

Die Ursache für die Aufgabe der Oase kann zusätzlich in dem Verfall oder der Dezentralisierung des Staats- und Wirtschaftswesens liegen oder davon begünstigt werden. Der Niedergang der Bewässerungskultur kann in den verschiedensten externen und internen Geschehen begründet sein.

Aus diesen Resultaten läßt sich der Schluß ableiten, daß weder ausschließlich natürliche noch unmittelbar anthropogene Einflüsse, die sich auf den technologischen Bereich beziehen, für die Aufgabe und den Verfall der Bewässerungskultur um Mārib ursächlich waren.

Zusammenfassend kommen nur die langsame, geogen oder klimatisch bedingte und für die Betreiber wahrscheinlich nicht nachzuvollziehende Verschlechterung der Ertragslage bis hin zur völligen Unfruchtbarkeit des Bodens trotz regelmäßiger Bewässerung und der eventuell damit zusammenhängende Verfall des Staatswesens, z. B. mangels Staatseinnahmen, der aber auch für sich betrachtet eine hinreichende Erklärung bietet, als maßgebliche Ursache für die Aufgabe der Oasennutzung in Frage.

Wenn auch der im Koran zitierte Dammbruch häufig als Ursache für den Verfall der sabäischen Kultur angesehen wurde, so muß diese Erklärung als falsch bezeichnet werden. Diese Katastrophe kann bestenfalls im Zusammenhang mit der Tatsache, daß der Damm nicht mehr wiedererrichtet wurde, „als den Verfall auslösendes Ereignis“ beschrieben werden. Die Staatsführung sah keine Notwendigkeit, den erforderlichen Wiederaufbau zu vollziehen, wie es vorher oft geschehen war, oder sie war dazu aus den unterschiedlichsten Gründen nicht mehr in der Lage.

Da die natürlichen Bedingungen für alle am Fuße der östlichen Gebirgshänge an der alten Weihrauchstraße gelegenen Oasen dieselben waren, ist der Niedergang dieser Welthandelsstraße des Altertums mit der schlechten landwirtschaftlichen Ertragslage plausibel zu erklären. Die Zerstrittenheit der verschiedenen Staaten und Kämpfe mit fremden Invasoren mögen den Verfall zusätzlich beschleunigt und die Verlagerung des Weihrauchtransportes vom Kamel auf das Schiff erst notwendig gemacht haben.

Tafeln 1–10



ÜBERBLICK ÜBER DIE FUNKTIONSSYSTEME DER
 BEWÄSSERUNGSKULTUR MARIB

0 1 2 3 4 5 km

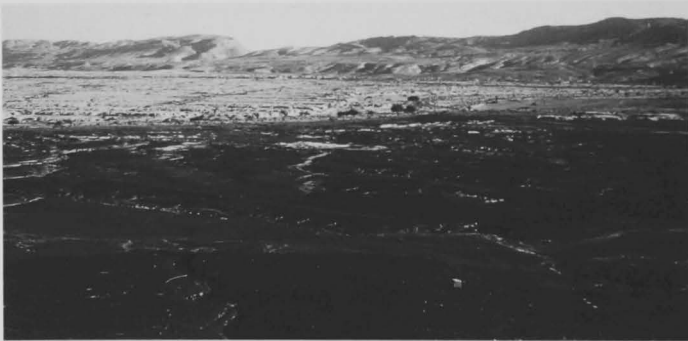
Luftbild der Oase von Märüb.



a. Fundament des älteren Südbaues S 3,
im Hintergrund Südbau S 1.



b. Felsriß im Tosbecken Südbau S 1.



c. Bruchstufe des Ġabal Balaq al-Qiblī am Steilabfall zum Becken der innerarabischen
Wüste.



d. Heutiges Mārib (Ansicht des Tells vom Wadi).



• 1-50

SEISMISCHE MESSPUNKTE

○ N4, N5, S6

BEWÄSSERUNGSBAUWERKE DER
FRÜHEN PERIODEN

○ HV

HAUPTVERTEILER

□

BRUNNEN

— • — • —

STROMSTRICH SITUATION II

— • — • —

STROMSTRICH SITUATION III

— — — — —

HÖHENLINIEN

Maßstab 1:30000

Topographische Karte des Oasenuntergrundes der westlichen Nordoase.



a. Terrassenfelder im Hochland.



b. Beim Erdbeben 1982 zerstörtes Haus in Mārib.



c. Schnittstelle zweier tektonischer Störungssysteme.



a. Geschichtete Stauraumsedimente mit zyklischer Rotfärbung.



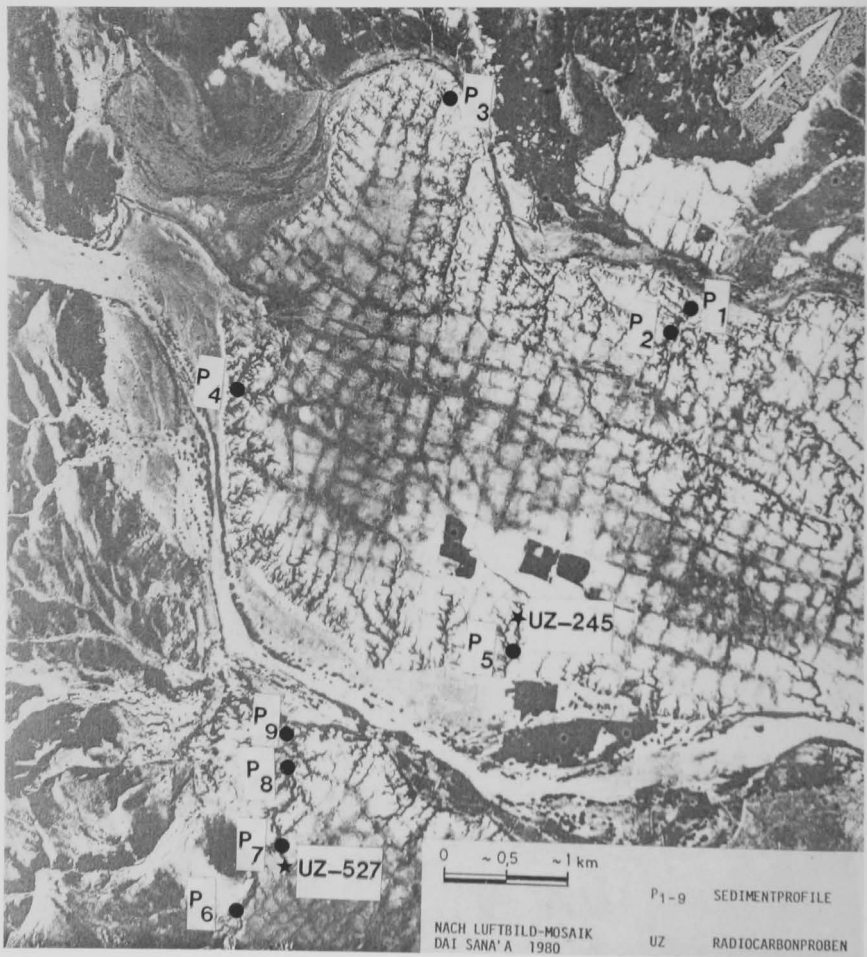
b. Stauraumsedimente am Damm. In der Bildmitte ist diagonal die Steinstickung der wasserseitigen Dammoberfläche während der Periode I zu erkennen.



c. Kleinrippeln in einem schluffigen Kanalsediment.



a. Der westliche Oasenteil, aufgenommen vom Ġibāl Daš al-Ḥašab.



b. Lage der Sedimentprofile und Radiocarbonproben.



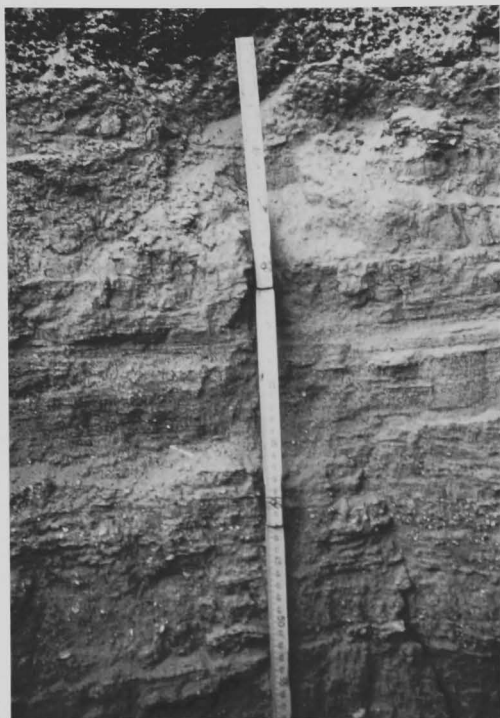
a. Profil P 1: rötliche Sedimente des „al-Mabnā“-Systems überlagern die älteren Hauptverteiler-Sedimente (siehe Markierung).



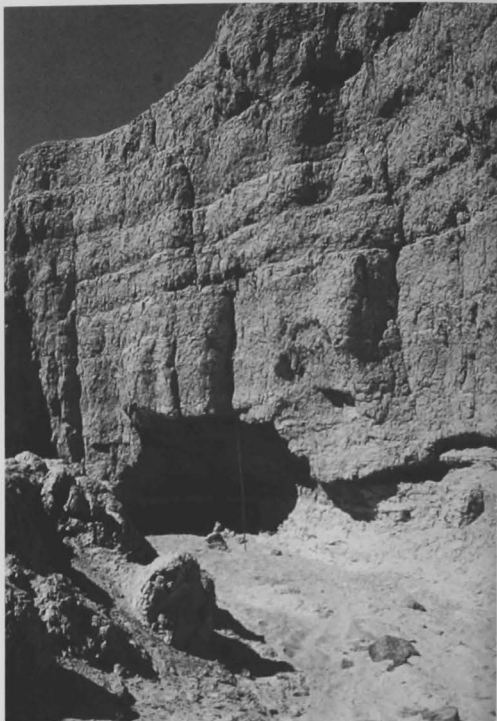
b. Profil P 3: Oasenbasis mit Wechsellagerung: Kies – Oasensediment (untere Bewässerungsterrasse).



c. Profil P 5: helle Kalkanreicherungen um die Schichtfugen.



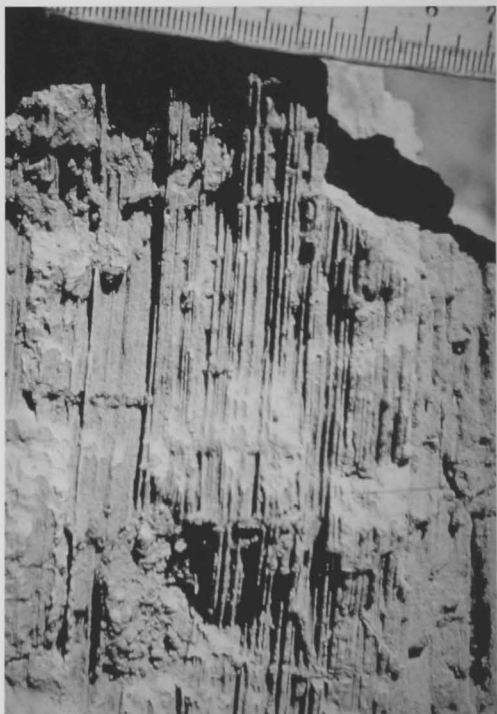
a. Sandige Ablagerungen im Hauptverteiler.



b. Profil P 9.



c. Substituierter Baum im Oasensediment.



d. Gradierte Sedimentschichten in der Nordoase.



a. Trockenrisse mit Prismenbildungen an der Oberfläche der Nordoase.



b. Kalksteine an der Absperung des Wādī Ġufayna.



c. Kalkgerölle auf Basalt als Beweis für Wadiverlauf.



— Absperr- und Ablenkmauern
 • Profil 3
 = Kanalrest

— — — — — Natürlicher Verlauf des Wadi Ġufayna
 Verlauf des Wadi Ġufayna nach Absperrung im Oberlauf
 - - - - - Oasenbegrenzung

Wadi Ġufayna während der Bewässerungsperiode 1
 N1/1-N1/4 Erosionsstadien
 Maßstab 1:30 000

Entstehung des Wadi Ġufayna.

